

Aproximación Holística

*En el manejo integrado de las cuencas,
para la conservación y recuperación
de cuerpos de agua superficiales.
“caso de estudio”.*

EDITORES:

Rebeca González Villela | Alfonso G. Bandejas Tarabay



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA



INVESTIGACIÓN



Aproximación holística

*En el manejo integrado de las cuencas, para la
conservación y recuperación de cuerpos de agua
superficiales.*

"CASO DE ESTUDIO"

EDITORES

REBECA GONZÁLEZ VILLELA
ALFONSO G. BANDERAS TARABAY

333.73

G64

González Villela, Rebeca

Aproximación holística en el manejo integrado de las cuencas para la conservación y recuperación de los cuerpos de aguas superficiales / Rebeca González Villela, Alfonso G. Banderas Tarabay. -- Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2016.
384 p.

E ISBN 978-607-9368-63-0

1. Cuencas 2. Gestión integrada de recursos hídricos 3. Aguas superficiales 4. Conservación del agua

Coordinación editorial:

Coordinación de Comunicación,
Participación e Información.
Subcoordinación de Vinculación, Comercialización
y Servicios Editoriales.

Primera edición: 2016.

Diseño editorial: Ricardo Torres Castillo
Diagramación y formación: Ricardo Torres Castillo
Fotografías de portada: Jorge Luis Izurieta Dávila
Inicio de capítulo: Jorge Luis Izurieta Dávila

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
62550 Progreso, Jiutepec, Morelos
MÉXICO
www.imta.gob.mx

E ISBN 978-607-9368-63-0



1. Área de Estudio. Laguna de Tuxpan, Gro. 16

Marco Mijangos Carro y Rebeca González Villela

2. Contaminación difusa en las subcuencas del Río Tomatal y Laguna de Tuxpan, Gro.

Marco Mijangos Carro y Rebeca González Villela

3. Erosión y sedimentación de las subcuencas del Río Tomatal y Laguna de Tuxpan, Gro.

Pedro Rivera Ruíz y Klaus Werner Wruck Spillecke

4. Limnología del Río Tomatal, Gro.

Rebeca González Villela, Ana Cecilia Tomasini Ortíz y Jorge Izurieta Dávila

5. Limnología de la Laguna de Tuxpan, Gro.

Luis A. Bravo Inclán, Javier Sánchez Chávez, Ariosto Aguilar Chávez y Jorge Izurieta Dávila

6. Plancton del lago “Laguna de Tuxpan, Gro.”

Alfonso G. Banderas Tarabay, Rebeca González Villela y Alejandro J. Ruíz López

7. Toxicología y Contaminación del lago “Laguna de Tuxpan, Gro.”

Yolanda Pica Granados, Alfonso G. Banderas Tarabay y Ana Cecilia Tomasini Ortiz

8. Propuesta tecnológica para el manejo y tratamiento de las aguas residuales del pueblo de Tuxpan (Gro.).

Gabriela Mantilla Morales y Ana Cecilia Tomasini Ortiz

9. Propuesta para el manejo, conservación y restauración del lago “Laguna de Tuxpan, Gro.”

Rebeca González Villela y Leonardo Hernández Barrios

El presente trabajo fue producto de un exhorto emitido por la Comisión del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la LXVII Legislatura del Senado de la República en el sentido de analizar el estudio exhaustivo que identificara las causas, niveles y grado de contaminación ambiental en la Laguna de Tuxpan, Municipio de Iguala de la Independencia, Gro., para implementar las acciones para combatir la contaminación. Propuesta presentada por el Senador Sofío Ramírez Hernández, integrante del Grupo Parlamentario del Partido de la Revolución Democrática y que generó un Punto de Acuerdo, donde se exhorta a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) para realizar el estudio correspondiente, y al Gobierno Estatal y Municipal para que implementara las acciones necesarias a partir del estudio realizado, para combatir la contaminación en la Laguna de Tuxpan. Por lo mismo, el presente estudio es producto del patrocinio de la CONAGUA y la Comisión de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Estado de Guerrero (CAPASEG), así como del trabajo técnico-científico y multidisciplinario de diferentes áreas del IMTA.

En este sentido el presente trabajo es el resultado del análisis y participación de la componente académica-científica, política y socioeconómica. Muchos autores mencionan que, para avanzar en el manejo integral de los recursos acuáticos es necesario incluir la colaboración cercana de investigadores y tomadores de decisiones para la evaluación de los impactos ambientales a través de herramientas científicas validadas. Iniciativas que deben incluir el dialogo entre las comunidades involucradas en la fase de la formulación de objetivos ambientales, enfoque que puede ser considerado de frontera al conectar la ciencia y la política en el marco del desarrollo sustentable operacional.

La cuenca es una unidad natural de territorio que sirve de base para articular procesos de gestión que tiendan al desarrollo sustentable, donde el manejo de los recursos naturales se efectúa armónicamente con el entorno, o ambientalmente sustentable, considerando al recurso hídrico como eje esencial, articulador de las acciones conducentes al crecimiento económico y la equidad. El margen de acción dentro de la cuenca lo forma el límite natural, o parte aguas, de la cuenca geohidrológica, o de alguna subunidad de la misma, como en muchas ocasiones se le denomina la subcuenca y la microcuenca. Se requiere evaluar sus recursos naturales para determinar su potencial y, en función de este, y aplicando el conocimiento, la tecnología, la metodología y la organización, fijar las metas ambientales, económicas y sociales del desarrollo (Casillas 2007).

La cuenca es un sistema complejo, dinámico, abierto y heterogéneo, y funciona como tal, por lo que se requiere caracterizar el medio biofísico delimitando unidades ambientales homogéneas, donde se pueda evaluar integralmente a cada componente natural, sin dejar de visualizar la heterogeneidad espacial. El área de la cuenca es drenada por un río y sus tributarios, mientras que los componentes están definidos por el relieve (cambios de altitud). Destaca el agua como elemento controlador del funcionamiento del ecosistema y, al mismo tiempo, como elemento central en el desarrollo económico y social de las comunidades. La delimitación de la cuenca está dada por la organización de los cauces. En su territorio conviene definir aspectos altitudinales en función de los cambios en la precipitación y la temperatura, en los tipos de rocas y materiales superficiales, como el relieve, los suelos y su potencial de productividad, en los cambios en la riqueza y abundancia de la biota, en el uso del suelo y en los sistemas productivos y en la organización social y política para el manejo de los recursos (Cotler 2007; Mass 2007; Bocco 2007).

El manejo integral de la cuenca, con un enfoque holístico, implica la gestión para el manejo ordenado y coherente de todo lo que existe en su territorio (ecosistemas, infraestructura y servicios creados por el hombre para satisfacer sus necesidades de habitación, transporte, sustento, recreación y trabajo), articulado por un sistema geohidrológico cuya frontera está definida por el parte aguas. El objetivo de la gestión es regular las acciones de los seres humanos, tanto las individuales como las colectivas, ya sean realizadas por las empresas o por las organizaciones

sociales. Estas acciones se ejecutan en función del (ecosistema), y se llevan a cabo en un espacio geográfico o región, estado, municipio, cuenca o acuífero. Los objetivos del desarrollo son las definiciones que sirven para orientar las acciones de los múltiples actores que interactúan en la cuenca y que le dan razón y sentido a los procesos de gestión (Chávez 2007). El objetivo final del manejo de las cuencas es mantener el equilibrio en los sistemas ecológicos y un nivel de calidad ambiental aceptable a través de la cantidad y calidad del agua de la cuenca (Caire 2007).

La visión holística integral de los sistemas es difícil de comprender desde la perspectiva de la ciencia clásica, se requiere efectuar modificaciones en algunos conceptos. La noción de complementariedad que fue crucial en el desarrollo de la física, también desempeña un papel de importancia en la nueva biología de sistemas. Según esta perspectiva es posible utilizar conceptos diferentes pero consecuentes entre sí para describir distintos aspectos y niveles de la realidad, sin que por ello sea necesario reducir los fenómenos de un nivel a los de otro (Ritter et al. 1979).

En el enfoque holístico, la naturaleza debe ser considerada como un todo si se desea conocerla en detalle, donde la sinérgica o el comportamiento colectivo, ordenado y organizado de los sistemas abiertos se tiene que describir con base en las normas en que se basa la autoorganización de sistemas. Los sistemas complejos como lo son las cuencas, son más que el resultado de la suma de sus partes, ya que tienen sus propias leyes y su lógica interna. El continuo despliegue de la complejidad organizada del ecosistema, su intrínseca capacidad de autoorganizarse esporádicamente constituye una propiedad fundamental.

El análisis de sistemas ocupa un lugar importante en el pensamiento científico tecnológico. Se trata de un esfuerzo de aprehensión totalizadora del conjunto de los fenómenos en los que se interesa el hombre y la sociedad, con el fin de sistematizar su dominio y, más particularmente, de organizar el conocimiento en función de un objetivo de control de la realidad social. Todas las variantes del análisis sistemático tienen una meta común: la integración de los diferentes campos científicos por medio de una metodología unificada de conceptualización (Ritter y Patiño 1997).

Es cierto que la ciencia posee también una tendencia hacia la síntesis y hacia el descubrimiento de contextos más amplios y leyes más generales. Pero la actitud predominante ha sido la de poner mayor énfasis en el análisis y en separar los factores clave de cada situación. Los estudiosos del ambiente tienen la esperanza de que esto les permita extender, de manera indefinida su capacidad de predecir y controlar las cosas. Al concentrarnos en este tipo de análisis y dividir constantemente los problemas en distintas áreas especializadas se va ignorando el contexto más amplio que da a las cosas su unicidad. Es entonces, el análisis de sistemas con un enfoque holístico una amplia estrategia de investigación que incluye el uso de conceptos y técnicas matemáticas con aproximación sistemática a la solución de problemas complejos. También se ocupa de la organización lógica de los datos e información en modelos, seguido por la exploración y prueba necesarios para su validación y mejoramiento (Ritter et al. 2002).

Asimismo, Ritter et al. (1997) señala que en la comprensión del comportamiento de los sistemas complejos es importante destacar dos aspectos; el primero, se refiere a que los elementos de un sistema determinan su existencia y funciones como un todo, mediante la interacción de sus partes; sin embargo, las propiedades de éstas últimas no necesariamente se mantienen cuando conforman el todo. El segundo aspecto se refiere a las relaciones que se forman entre los sistemas, aspecto que opera en otra escala espacio-tiempo, y que desde luego aumenta su complejidad, ya que cada sistema puede actuar de manera no predecible, en virtud de que posee propiedades emergentes, que surgen o se manifiestan mientras el sistema o los sistemas se encuentran en acción, y que se caracterizan por ser sorprendentemente impredecibles.

Hay que tener presente que un sistema complejo contempla el todo y las partes, así como las conexiones entre las partes, y cuando se estudian las partes es para poder comprender el todo. El ambiente es un sistema complejo, cuyo funcionamiento se trata de entender con el auxilio de las matemáticas más adecuadas. Por lo tanto, el comportamiento en los sistemas de grandes dimensiones a menudo resulta imprevisible, ya que están sujetos a grandes variaciones como consecuencia de lo que parecen ser cambios secundarios, por lo que se les da el nombre de sis-

temas con un “comportamiento caótico”. En los sistemas que manifiestan un comportamiento caótico, el más pequeño error que aparezca en nuestro conocimiento acerca de su estado inicial nos conducirá muy pronto a una incertidumbre total con respecto a sus condiciones reales. El comportamiento caótico no puede predecirse, aunque las ecuaciones fundamentales tengan un carácter determinístico (Ritter et al 2002).

La visión holística contempla también el hecho de que no existen estructuras estáticas en la naturaleza. Existe una estabilidad, y ésta es el resultado de un equilibrio dinámico. Sin embargo, el concepto de equilibrio es una abstracción matemática, ya que en la vida real sólo existe como aproximación. Los sistemas no son exactamente como fueron antes de ser perturbados; por lo tanto, las condiciones en los sistemas restaurados son raramente idénticas a las iniciales. Existen fuerzas en la naturaleza que mantienen su equilibrio, resistiendo a los cambios diarios, y otras que demandan modificaciones por medio de procesos evolucionarios de forma más prolongada y lenta. Las estructuras disipativas tienen la interesante propiedad de ser autoorganizativas y el sistema actúa como una totalidad. En la evolución, los sistemas complejos pueden incluir flujos convergentes, principio fundamental de la homeostasis, lo que significa estabilidad ante la perturbación. Los sistemas complejos se adaptan como resultado de su capacidad de procesamiento de información y de su eficiencia biológica, para alcanzar un estado colectivamente beneficioso, a través del control que desarrollan las vastas redes de los elementos que los integran durante sus interacciones. Cada uno establece las condiciones para el éxito de los demás y en un sentido global, unos y otros coexisten entre el caos y el cuasi-equilibrio, a través de la interacción de sus partes (Ritter et al. 1979).

El planteamiento teórico y metodológico de los sistemas complejos y el enfoque ecosistémico, considera que las dimensiones y procesos observados en el desarrollo de la cuenca no se pueden abordar de manera fragmentada, sino sistémica. Se parte de enfoques integradores y articulados entre ellos para permitir hacer los planteamientos sustantivos en términos de líneas estratégicas tendientes a reforzar las acciones para el manejo, conservación y recuperación (De la Maza

y Carabias 2011), como en este estudio del cuerpo de agua “Laguna de Tuxpan”. En este sentido y dado que en México las cuencas presentan graves problemas de degradación. La deforestación, el incremento desordenado de la superficie agrícola, la ganadería extensiva, los sistemas de producción inadecuados y la casi nula planeación de los procesos de producción y de asentamientos humanos, originan el deterioro de grandes superficies con alto potencial agrícola, silvícola o pecuario al convertirse en tierras áridas o con reducido potencial productivo. Asimismo, el uso de tecnologías modernas inadecuadas para el uso potencial local de los recursos, ha propiciado la salinización, alcalinización y compactación de los suelos, perdiéndose su potencial productivo y el abandono de las actividades agropecuarias, fusionándose a la pobreza rural y a la inseguridad alimentaria que prevalecen en cientos de comunidades rurales (Casillas 2007).

En este estudio se muestra una propuesta metodológica holística para el manejo racional e integrado de las subcuencas del río El Tomatal y Laguna de Tuxpan, para la conservación y recuperación del lago “Laguna de Tuxpan”. La metodología tiene un enfoque multidisciplinario ecosistémico que considera las componentes ambiental (Biofísica), sociopolítica y económica del sistema. Por lo tanto, requiere información de varias disciplinas para integrar el plan estratégico de manejo, conservación y recuperación del lago, obtenida con los sistemas de información geográfica para la descripción de la geología, edafología, vegetación y uso del suelo. Así como del clima, la deforestación, la erosión y sedimentación, la contaminación puntual y difusa, la conservación del corredor fluvial, la calidad y cantidad del caudal del río y del agua del lago, su caracterización trófica, la composición, estructura y dinámica del plancton, la contaminación por metales pesados y por compuestos orgánicos volátiles y no volátiles, y de la toxicología del agua mediante el análisis de las cianobacterias (*Microsistis*), y cultivos de la microalga *Pseudokirchneriella subcapitata* (sin. *Selenastrum capricornutum*), el cladóceros *Daphnia magna* y la bacteria *Vibrio fischeri*. También se incluyen la caracterización socioeconómica de la población y las propuestas técnicas para el manejo de aguas residuales dentro del plan estratégico elaborado, donde se proponen los programas gubernamentales e instituciones que pueden apoyar

económicamente cada una de las propuestas para el manejo, conservación y recuperación del lago.

Como resultado, se generaron los mapas específicos de topografía, suelos, vegetación, hidrología superficial, erosión y sedimentación de las 32 microcuencas. La erosión y la sedimentación se evaluaron mediante muestras de 20 unidades de suelo a las que se midieron las variables físicoquímicas granulometría, densidad aparente, textura, pH, materia orgánica, nitrógeno orgánico, fósforo asimilable, potasio intercambiable, calcio intercambiable, magnesio intercambiable, hierro, cobre, zinc, manganeso, la curva de retención de humedad, y la conductividad hidráulica. Los mapas de descargas de aguas residuales puntuales en las riberas del lago y del río, y el análisis de la calidad del agua durante 24 horas en 8 puntos de muestreo en las épocas de lluvias y secas, específicamente en tres descargas al río y cinco puntos dentro el río mediante: temperatura, pH, conductividad, materia flotante, color, olor, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, grasas y aceites, nitritos, nitratos, nitrógeno total, fósforo total, gasto, coliformes fecales, coliformes totales, huevos de helminto, agroquímicos, cobre, plomo, níquel, zinc, mercurio, cromo, arsénico y cadmio; analizados en forma comparativa con la NOM-001-SEMARNAT-1996 para cuatro tipos de cuerpo receptor de acuerdo a la Ley Federal de Derechos.

El estudio limnológico incluyó los planos batimétricos del lago con los contornos de nivel calculados en forma tridimensional, con una tendencia a la disminución de la profundidad en la desembocadura del río debido a la acumulación de sedimentos. La ubicación de cinco sitios superficiales y uno de fondo en época de lluvias y secas para evaluar temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad, sólidos disueltos totales, turbidez, potencial redox, profundidad, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, color verdadero, alcalinidad total, dureza, cloruros, sulfatos, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, detergentes (SAAM), grasas, aceites, fosfato total, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y nitrógeno total, así como la transparencia y clorofila a. Se califica la calidad del agua en el lago siguiendo los Criterios ecológicos de Calidad del Agua (CECA) y de la Ley Federal de Derechos (LFD). Por la cantidad de clorofila, concentración de fosfatos y lectura del disco de Secchi el lago es cata-

logado como Meso – Eutrófico. Se determinó la composición, estructura y ecología de la comunidad de plancton.

Se generaron las propuestas tecnológicas para el tratamiento de las aguas residuales de los afluentes al lago en las que se incluyeron la instalación de una red de alcantarillado para el pueblo de Tuxpan, que permita la captación de las aguas residuales de las calles y avenidas que van al río. Se diseñó el programa de acciones para la recuperación de la vegetación del corredor fluvial y de las subcuencas, así como la aplicación de prácticas y obras de conservación para regular los escurrimientos superficiales, inducir la infiltración y la recarga, mejorar la capacidad biológica de los suelos para favorecer la calidad del agua del río Tomatal y del lago Laguna de Tuxpan.

Se identificaron los problemas prioritarios así como las estrategias y acciones ligadas a una serie de objetivos y metas generales científico-tecnológicas que definen la situación ambiental de la cuenca. Paralelamente, se realizaron consultas y reuniones con representantes de diversas instituciones y organismos no gubernamentales para consensuar, validar y jerarquizar los proyectos específicos que forman parte de la solución a los problemas. Las acciones se agruparon de acuerdo al problema prioritario que atienden y la forma en la que se encuentran asociados a los objetivos, metas y acciones que se persiguen para atenuar el problema prioritario.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con recursos de la **CONAGUA** (*Comisión Nacional del Agua*) y **CAPASEG** (*Comisión de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Estado de Guerrero*). Se agradece a la Dra. Alejandra Martín Domínguez del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por el apoyo logístico brindado para la realización del mismo. A Mauricio Alba Urióstegui por la edición de algunas imágenes.



Área de Estudio.

EDITORES:

Marco A. Mijangos Carro

Rebeca González Villela

CONTENIDO

Capítulo 1

1.1 INTRODUCCIÓN	18
1.2 ÁREA DE ESTUDIO	19
1.3 MÉTODOS	22
1.4 RESULTADOS	23
1.4.1. <i>Clima</i>	23
1.4.2. <i>Modelo Digital de Elevación e hidrología</i>	26
1.4.3. <i>Geología y Edafología</i>	26
1.4.4. <i>Vegetación y Uso del suelo</i>	29
1.5 CONCLUSIONES	29
1.6 REFERENCIAS	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.2.1. <i>Placa conmemorativa de la obra Canal de Tuxpan, para el Distrito de Riego de Iguala en el Estado de Guerrero (Modificada de IMTA 2013).</i>	20
Figura 1.3.1. <i>Ubicación de las estaciones meteorológicas cercanas a la Laguna de Tuxpan y Río Tomatal consultadas para el cálculo de las isotermas e isoyetas.</i>	22
Figura 1.4.1. <i>Comportamiento de la temperatura entre 1981 y 2009 en la estación meteorológica Laguna de Tuxpan, Gro (Modificada de IMTA 2013).</i>	23
Figura 1.4.2. <i>Isotermas medias anuales, máximas promedio, mínimas promedio y precipitación media anual para las subcuencas de la Laguna de Tuxpan y el río Tomatal (Modificada de IMTA 2013).</i>	25
Figura 1.4.3. <i>Modelo digital de elevación del suelo de las cuencas. mapa hidrológico, geológico y edafológico de la Laguna de Tuxpan y Río Tomatal (Modificada de IMTA 2013).</i>	28
Figura 1.4.4. <i>Tipos de vegetación y uso del suelo que se presentan en las subcuencas de la Laguna de Tuxpan y del Río Tomatal (Modificada de IMTA 2013).</i>	29
Figura 1.4.5. <i>Uso del suelo en las subcuencas de la Laguna de Tuxpan y del Río Tomatal (Modificada de IMTA 2013).</i>	30

1.1 INTRODUCCIÓN

Los factores físicos permiten definir una región natural e individualizarla como “región homogénea”. Esta noción se emplea para iniciar el estudio regional de una parte de la superficie terrestre. Una región natural está delimitada por criterios de geografía física, sobre todo los que tienen que ver con el relieve y, en menor grado, con el clima, la hidrografía, la vegetación, los suelos y otros. Se tiene así la definición de regiones climáticas, hidrográficas, edáficas, fitogeográficas, etc. Por lo tanto, cada una de las unidades territoriales determinadas por el relieve, el clima y la vegetación constituye una región natural. En una región geográfica, los fenómenos humanos colectivos son complejos y difíciles de definir y aún más de delimitar, sus límites son convencionales y dependen en gran parte del criterio empleado, y cambian en el tiempo. Asimismo, el análisis de gran parte de los fenómenos hidrológicos que ocurren sobre un determinado espacio geográfico suele tener como referencia a la unidad fisiográfica conocida como cuenca (Cotler 2007).

La cuenca es un espacio geográfico cuyos aportes hídricos naturales son alimentados exclusivamente por la precipitación y donde los excedentes de agua convergen en un punto espacial único. Las características físicas de una cuenca desempeñan un papel esencial en el estudio y comportamiento de parte de los componentes del ciclo hidrológico como la evaporación, la infiltración, el flujo superficial, entre otros (Díaz et al. 1999). Por lo tanto, en este estudio se efectúa la descripción del clima, hidrología, topografía, geología, edafología, vegetación y uso del suelo de las Subcuencas “El Tomatal” y “Laguna de Tuxpan”, Gro., que influyen en la calidad del agua del río y el lago.

1.2 AREA DE ESTUDIO

El municipio de Iguala se encuentra al norte de la ciudad de Chilpancingo, Guerrero, y está ubicado entre los paralelos 18°13" y 18°27" de latitud Norte y 99°29" y 99°42" de longitud Oeste. Su cabecera municipal es Iguala de la Independencia, que colinda al norte con los municipios de Buena Vista de Cuellar y Taxco; al este con Huitzucó, Cocula y Tepecoacuilco; y al oeste con Teloloapan. La ciudad se encuentra a 731 msnm, con una población de 140,363 habitantes (INEGI 2010). Forma parte de la región norte del Estado, con una superficie de 567.1 km² que representan el 0.89% del territorio estatal. La configuración del suelo es representativa de tres tipos de relieve: el que constituye las zonas accidentadas (40 por ciento del territorio municipal localizadas principalmente en Coacoyula de Álvarez), donde destacan los cerros Tuxpan con 1,695 metros; Conejo con 1,237 y Grande o Pípilas con 1,420 m. El 30% lo componen zonas semiplanas localizadas al oriente y sur del municipio, sobre las localidades de Ahuchupan, Motlapa, Ceja Blanca y Planta de Zapotal. Las zonas planas constituyen el 30% restante y se localizan en el centro, norte y oriente. Los cuerpos de agua que se encuentran en el municipio son el lago (Laguna de Tuxpan) y los ríos San Juan y Tomatal (con caudales permanentes), los arroyos de escurrimientos temporales la Ceja Blanca, las Tijerillas, el Naranja y varios pozos de extracción de agua (Mijangos et al. 2015).

El lago (Laguna de Tuxpan) se encuentra localizado al sureste del municipio de Iguala entre los paralelos 18° 21' 43.96" y 18° 21' 22.31" de latitud norte y 99° 30' 9.97" y 99°28' 45.12" de longitud oeste. Forma parte de la región norte, tiene una longitud de 2.75 kilómetros y un ancho máximo de 2.23 km, y en su vecindad se encuentra el pueblo de Tuxpan con una población de 2,086 individuos. Es un lago de origen tectónico formado en una depresión de la corteza terrestre. Este tipo de lagos yacen en una subsidencia. Muchas de estas depresiones se convierten en depósitos de agua debido a la baja porosidad de los sedimentos (Wetzel 2001). En muchos lagos los aportes de agua subterránea

pueden ser muy importantes y llegan a representar la mitad del aporte hidrológico anual con grandes cargas de fósforo y nitrógeno, como parece suceder en el lago “Laguna de Tuxpan”. Según el reporte “Reservas de la Biósfera y otras Áreas Protegidas de México” (1995), el lago está catalogado como Presa Laguna de Tuxpan, con fecha de Decreto del 3 de agosto de 1949, con una superficie de 10,000.00 hectáreas y con categoría ZPF (Zona Protectora Forestal).

Las subcuencas de El Tomatal y de la Laguna de Tuxpan, presentan pocos afluentes en su recorrido hasta el lago. Solamente el río Tomatal se incorpora al cauce con escurrimiento permanente, siendo este una desviación de la obra civil hidráulica construida a principios de los años 40’s, por la Comisión Nacional de Irrigación durante la presidencia del Gral. Lázaro Cárdenas (1934–1940) y del Presidente Manuel Ávila Camacho (1940–1946), como puede observarse en la Figura 1.2.1.



Figura 1.2.1. Placa conmemorativa de la obra Canal de Tuxpan, para el Distrito de Riego de Iguala en el Estado de Guerrero (Modificada de IMTA 2013).

Piperno et al. (2007) informan que la Laguna de Tuxpan tiene una longitud de 2.5 a 1.75 km, y una antigüedad de aproximadamente 3,000 años A.C. Está constituido por tres costras paralelas en la parte más profunda (5.5 y 5.8 metros). Señalan que una capa de sedimentos de cuatro a seis metros fueron depositados por la desviación hacia el lago del efluente “El Tomatal” hace más de 50 años.

Previo a este evento, la profundidad del lago era de 15 m y albergaba una alta variedad de peces y crustáceos nativos, por lo tanto, estos sedimentos provocaron la pérdida de 800 a 1,000 años de registros paleolimnológicos. Los sedimentos antiguos indican aportes de material erosionado de las márgenes del lago y los aportes de la cuenca llevados por las escorrentías en la época de lluvia.

La presencia de polen y fitolitos indican que el lago experimentó sequías estacionales frecuentes. Se encontraron una alta variedad de diatomeas que datan de 2,680 a 40 años A.C. Todo señala que el lago tuvo su origen hace 5,000 años A.P., y por el tipo de sedimentos encontrados, el lago ha permanecido desde entonces. Las diatomeas fósiles pertenecen al género *Aulacoseira*, y el polen a fitolitos de árboles como *Bursera*, *Cordia*, *Eugenia*, *Protium*, Sapotaceae, *Spondias* y la variedad de palma africana *Elaeis*, que se explica debido a la influencia humana.

1.3 MÉTODOS

La información de precipitación, evaporación, temperaturas observada, mínima y máxima se obtuvo con el sistema ERIC III. Versión 2.0 (Extractor Rápido de Información Climatológica del IMTA), de la estación meteorológica Laguna de Tuxpan (12222) ubicada en la latitud 18.5° 21' 0.15", longitud 99° 28' 46.62" y altitud de 740 msnm, con registros de 1981 a 2009. Para el cálculo de las isotermas e isoyetas se consideró la información de 69 estaciones meteorológicas ubicadas en los alrededores de la zona (Figura 1.3.1). La descripción del área de estudio se efectuó con los mapas temáticos de topografía, geología, edafología, clima, vegetación y uso del suelo a través del Sistema de Información Geográfica (SIG). Se describe la variación climática temporal del área para la estación 12222.

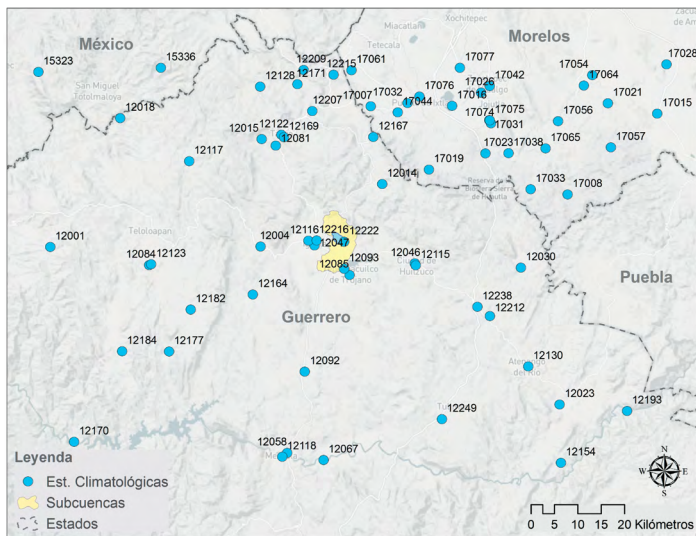


Figura 1.3.1. Ubicación de las estaciones meteorológicas cercanas a la Laguna de Tuxpan y río Tomatal consultadas para el cálculo de las isotermas e isoyetas.

1.4 RESULTADOS

1.4.1 Clima

Las características climáticas basadas en la temperatura media anual y la precipitación total anual de 29 años, mismas que representan la variación interanual en la estación Tuxpan (12222), se muestran en la Figura 1.4.1. La

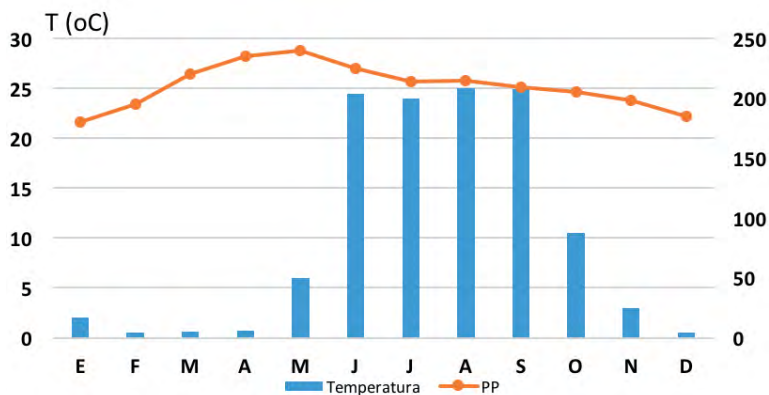


Figura 1.4.1. Comportamiento de la temperatura entre 1981 y 2009 en la estación meteorológica Laguna de Tuxpan, Gro. (Modificada de IMTA 2013).

temperatura máxima de 28.07 °C se presenta en el mes de mayo, y el mínimo de 22.64 °C en diciembre. La precipitación máxima ocurre en el mes de agosto con 207.76 mm y la mínima en diciembre. Aplicando los criterios de la clasificación climática de Köppen-García (1973), el análisis de la precipitación y la temperatura de 1981 a 2009 indicó una precipitación total anual de 974.9 mm, una temperatura media anual de 21.29 °C; una precipitación del mes más lluvioso (septiembre) de 207.50 mm, y del mes más seco (febrero) de 1.60 mm; un Índice de Lang (P/T) de 45.79; un porcentaje de lluvia invernal respecto al total anual; una

temperatura del mes más caliente (junio), de 23.5 °C, y la del mes más frío de 18.7 °C (diciembre); una oscilación anual de la temperatura media mensual de 4.8 (°C) que corresponde a un clima tipo A(C)w1(w)i, o sea tropical lluvioso con temperatura media del mes más frío mayor de 18 °C, y temperatura media anual entre los 18 °C y los 22 °C, con clima caliente en verano y caracterizado como húmedo o subhúmedo con lluvias en verano, que está considerado como intermedio entre los climas cálidos y templados (semicálido). Con un régimen de lluvias de verano; con una precipitación en el mes más húmedo en la mitad caliente que supera 10 veces la del mes más seco. Con valores de oscilación isotermal y con una marcha anual de la temperatura tipo Ganges. Las isotermas medias anuales en las subcuencas del Lago de Tuxpan y río El Tomatal se observan en la Figura 1.4.2. La temperatura promedio anual del área que comprende el lago es de 24° C; en las zonas más altas de la subcuenca es de 22° C y en la subcuenca del río El Tomatal de 27° C. Esta variación está asociada con la altitud. Las isotermas máximas promedio para las dos subcuencas indican una temperatura de 33° C para el área que circunda al lago. Los valores máximos se presentan en las zonas altas de las subcuencas, con 35° C para el lago y 36° C para el río. La temperatura más baja en el área del lago se debe a su mayor capacidad calorífica por efecto del cuerpo de agua, amortiguando las variaciones y haciendo más estable el clima de sus alrededores.

Las isotermas mínimas promedio obtenidas indican temperaturas de 16 y 17° C que dividen al cuerpo de agua en dos partes, debido a la influencia del viento y de la corriente de agua del río dentro del lago, que promueven cambios físico-químicos en todo el cuerpo de agua, aspecto que se ve reflejado claramente en las isotermas mínimas promedio.

La precipitación media anual para el área de las subcuencas indica que el lago tiene una precipitación de 990 mm, con los mayores valores en las zonas altas de la subcuenca, y con valores de 1,100 a 1,160 mm para la zona norte del poblado de Iguala.

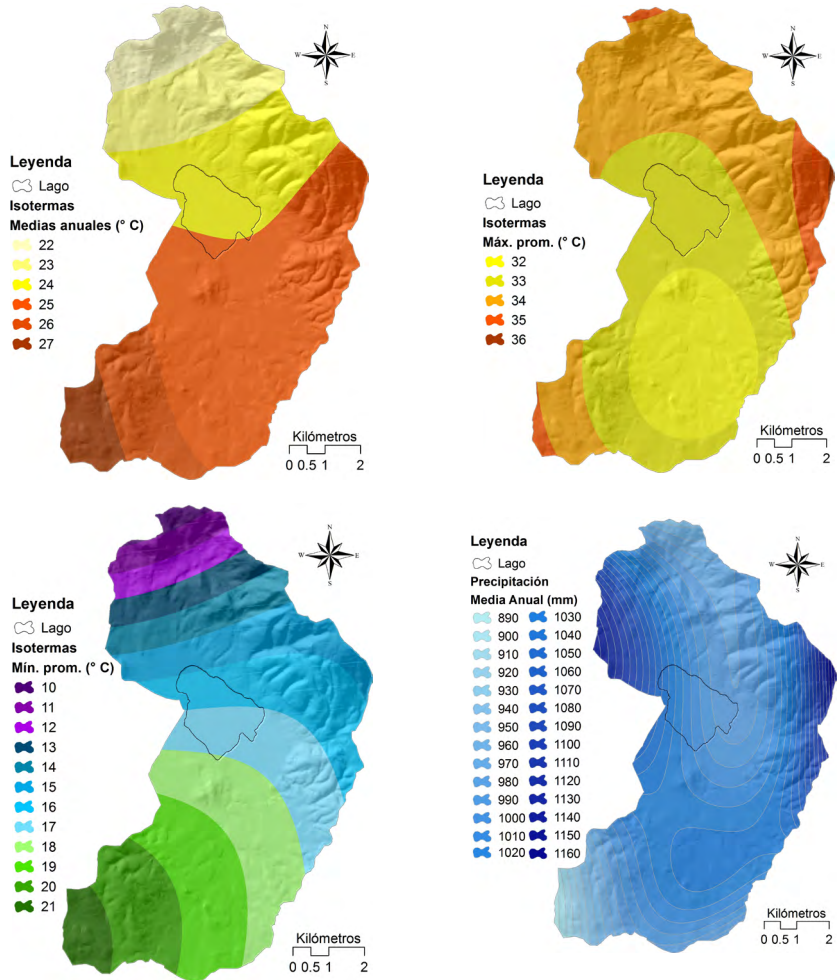


Figura 1.4.2. Isothermas medias anuales, máximas promedio, mínimas promedio y precipitación media anual para las subcuencas de la laguna de Tuxpan y el río Tomatal (Modificada de IMTA 2013).
Fuente: INEGI (2013) Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 escala 1:50,000

1.4.2 Modelo Digital de Elevación e hidrología.

La topografía muestra que las subcuencas están localizadas al norte de la subregión del medio Balsas, cuya cuenca es exorreica. Esto significa que el agua escure hacia el lago y de aquí sale hacia el río Balsas por el Canal de Tuxpan. La fisiografía muestra que los cerros ubicados en las áreas NE, N y SW de las subcuencas superan los 1,731 msnm; y los demás oscilan entre 1,000 y 1600 msnm (Figura 1.4.3). Las subcuencas están moderadamente rodeadas de cerros de caliza-dolomía y suelo con pendiente de ligera a moderadamente pronunciada. La hidrología está constituida de una serie de arroyos poco evidentes y el río Tomatal, que conducen el agua de lluvia al lago. El funcionamiento hidrológico tiene su sustento en las infiltraciones a través de los manantiales subterráneos y subacuáticos que emergen por doquier.

1.4.3 Geología y Edafología

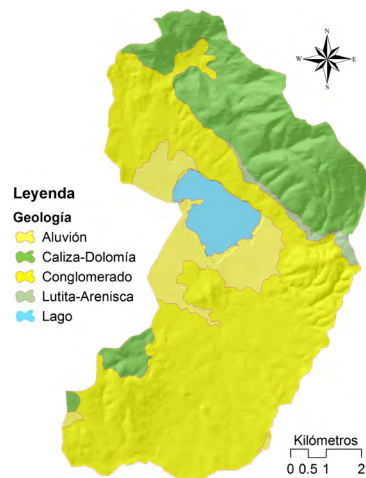
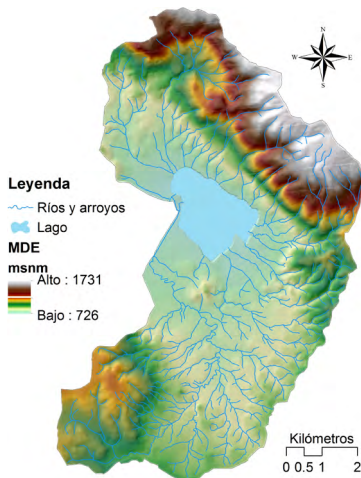
Las rocas de las subcuencas son principalmente caliza-dolomía, aluvión, conglomerado polimíctico-arenisca, y lutita-arenisca de los Periodos Cretácico Inferior y Superior, Terciario Paleógeno y Cuaternario, con rocas que varían desde el Cretácico Inferior al Reciente. Subyacen concordantemente a calizas de la formación Morelos (KaceCz-Do) del Albiano-Cenomaniano. Sobreyaciendo a esta unidad, también concordantemente, se depositó una secuencia terrígeno-calcárea denominada Mezcala (KtcLu-Ar), con un afloramiento discordante y una secuencia sedimentaria continental, con intercalaciones de rocas volcánicas de la formación Balsas (TeCgp-Ar) que se les considera de una edad correspondiente al Eoceno.

Los suelos se originaron por cenizas volcánicas o rocas calizas, calcáreas y sedimentarias y fueron modificados por la acción de los factores climáticos y la vegetación. En la actualidad las subcuencas presentan un amplio mosaico de tipos edafológicos. Entre los más importantes se puede mencionar: Luvisol, Regosol, Cambisol, Vertisol, Castañozem, Feozem, Rendzina y Litosol (Figura 1.4.3).

El Luvisol con contenido de bases que va de mediano a alto. El subsuelo presenta acumulación de arcillas como resultado del lavado y la formación in situ. En las zonas tropicales son de color rojizo y amarillento en las zonas templadas; muy susceptibles a la erosión. Se localizan fundamentalmente bajo climas templados y tropicales, sobre terrenos de topografía variada. Se hallan ampliamente asociados con andosoles, vertisoles, cambisoles y rendzinas. Sobre ellos se desarrolla una vegetación de selva o pastizal.

El Regosol son suelos poco desarrollados, constituidos por material suelto, muy semejante a la roca de la cual se originó. Dependiendo del tipo de clima sustentan cualquier tipo de vegetación.

En tercer lugar, predomina el tipo Cambisol, que son suelos claros, con desarrollo débil, que presentan cambios en su estructura o consistencia debido al intemperismo. Con frecuencia presentan todavía características del material que los originó. Dependiendo del clima, pueden sustentar una vegetación de matorral, pastizal, bosque o selva. Se encuentran en cualquier tipo climático, en terrenos abruptos, ondulados o planos. Se asocian con regosoles o feozem.



Fuente: INEGI (2013) Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 escala 1:50,000; Fuente: CETENAL (1973) Carta temática edafológica escala 1:50,000; Fuente: CETENAL (1976) Carta temática edafológica escala 1:50,000

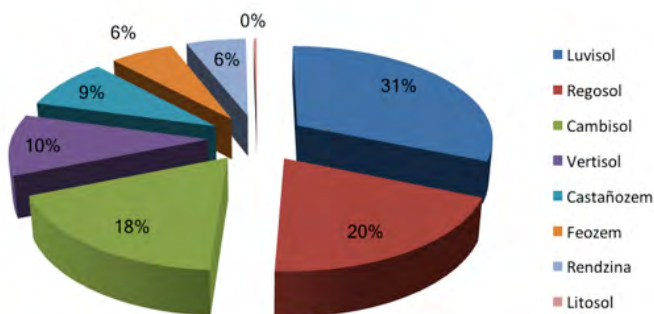
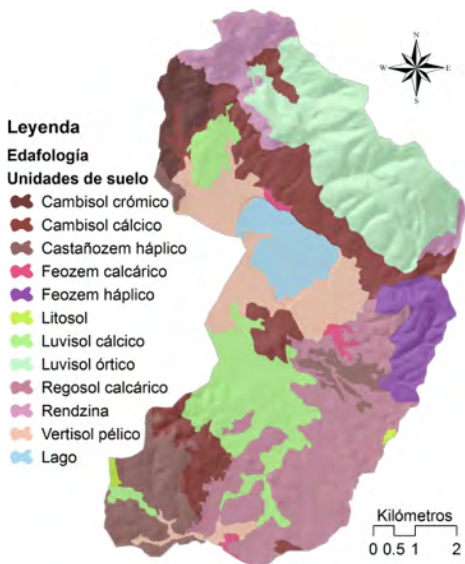


Figura 1.4.3. Modelo digital de elevación del suelo de las subcuencas. Mapa hidrológico, geológico y edafológico de la Laguna de Tuxpan y río Tomatal (Modificada de IMTA2013).

1.4.4 Vegetación y Uso del suelo

En general, la vegetación de las subcuencas presenta cobertura de selva baja caducifolia, bosque de encino, pastizal, nopalera, palmar, agricultura de dos estaciones, e hidrófitas. En un diagnóstico previo de 1975, con la carta del tipo de vegetación y uso del suelo, escala 1:50000, se encontró un relativo predominio de selva baja caducifolia (35.85%), seguido por el pastizal inducido (29.88%) y de agricultura de temporal (19.28%). Estos tres tipos ocuparon el 80.94% de la superficie total de las subcuencas. Por lo tanto, la selva baja caducifolia y la vegetación secundaria, forman parte de la flora junto con la agricultura de temporal, la agricultura de riego y los pastizales inducidos, con escasa presencia del bosque de encino y la vegetación hidrófita (Figura 1.4.4).

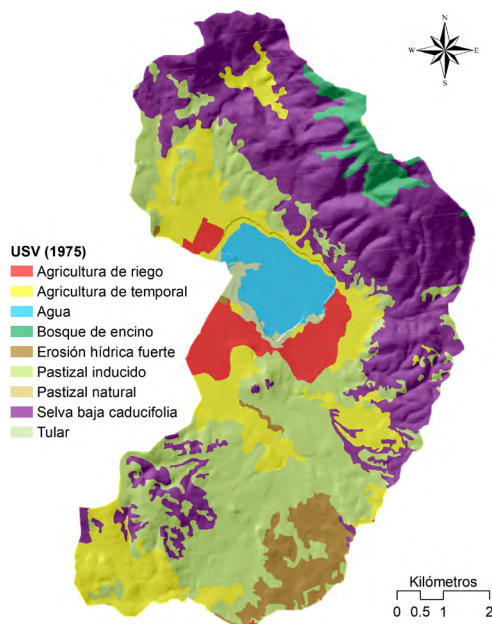


Figura 1.4.4. Tipos de vegetación y uso del suelo que se presentan en las subcuencas del lago de Tuxpan y del río Tomatal (Modificada de IMTA 2013). Fuente: CETENAL (1975) Carta temática Uso del suelo escala 1:50,000

El uso del suelo en las subcuencas es heterogéneo, resaltando en el mosaico la presencia de la selva secundaria caducifolia mezclada con la agricultura de temporal, tanto en las elevaciones como en la planicie. En la parte norte se han realizado reforestación en la zona de Platanillo. Otro aspecto importante es la presencia de poblados pequeños en las dos subcuencas. La zona rural predomina con más concentración en la parte centro y sur (Figura 1.4.5).

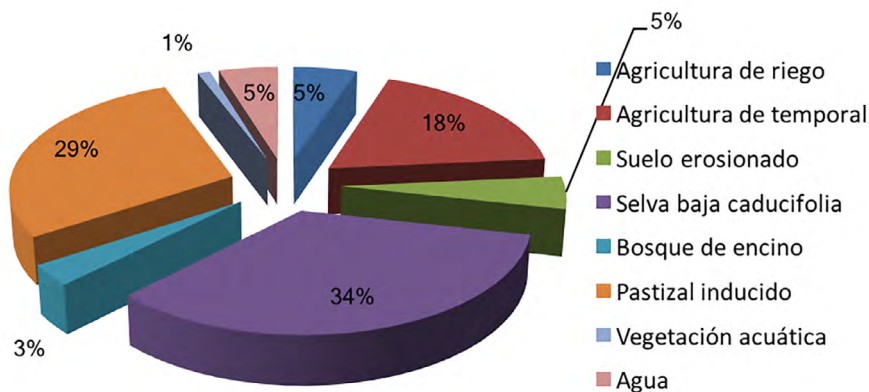


Figura 1.4.5. Uso del suelo en las subcuencas de la Laguna de Tuxpan y del río Tomatal (Modificada de IMTA 2013). Fuente: CETENAL (1975) Carta temática Uso del suelo escala 1:50,000

1.5 CONCLUSIONES

El clima se determina con base en las estadísticas de los elementos del tiempo atmosférico: temperatura, humedad, presión, viento y precipitación, durante un periodo representativo en una región dada. Los datos que contienen la información meteorológica se deben recopilar de manera sistemática y homogénea durante períodos suficientemente representativos (30 años o más). Para este estudio, el periodo fue de 29 años, debido a que en las zonas subtropicales o intertropicales, y especialmente en la faja ecuatorial, los datos meteorológicos necesitan ser obtenidos de periodos más largos para encontrar las pequeñas variaciones, porque el clima es más estable y menos variable que en las zonas templadas (Budiko 1982).

En la subcuenca de la Laguna de Tuxpan el clima fue A(C)w1(w)i, que indica un tipo de clima tropical lluvioso, con temperatura media del mes más frío mayor de 18 °C, y temperatura media anual entre los 18 y los 22 °C, con clima caliente en verano caracterizado como húmedo o subhúmedo con lluvias en verano. Considerado como clima intermedio entre los climas cálidos y templados (semicálido). Con un régimen de lluvias de verano, cuyo mes más húmedo, en la mitad caliente del año, supera en por lo menos 10 veces la precipitación del mes más seco. La oscilación de la temperatura se cataloga como isotermal, con una marcha anual tipo Ganges.

La topografía presentó cerros ubicados en las áreas del SW, N y NE que superan los 1,731 msnm. El resto oscila entre los 1,000 y 1,600 msnm. La hidrología presenta al río El Tomatal y una serie de arroyos poco evidentes que conducen la precipitación al lago. Las subcuencas constan de terrenos con pendiente de ligera a moderadamente pronunciada parcialmente rodeados por cerros de caliza-dolomía. La geología presenta roca caliza-dolomía principalmente, con aluvión, conglomerado polimíctico-arenisca y lutita-arenisca de los Periodos Cretácico Inferior, Cretácico Superior, Terciario Paleógeno y Cuaternario.

Se observa un mosaico muy diverso de suelos, con predominio de Luvisol (principalmente órtico y cálcico) con 31.2%, Regosol (principalmente calcárico) con 19.7% y Cambisol (principalmente cálcico y crómico) con 18%. Estos tres tipos de suelo ocupan el 69% de la cuenca. En la vegetación predomina la selva baja caducifolia (35.85%), seguida por el pastizal inducido (29.88%) y la agricultura de temporal (19.28%). En total, estos tres tipos ocupan el 80.94% de la superficie de las subcuencas. El uso del suelo es heterogéneo, resaltando la agricultura de temporal en toda la cuenca, tanto en las elevaciones como en la planicie. En la parte norte se ha reforestado la zona de Platanillo. Resulta importante la presencia de poblados pequeños en las dos subcuencas. La zona rural predomina con más concentración en la parte centro y sur.

El balance hidrológico en el sistema del lago se realizó de acuerdo a las entradas por: 1) precipitación, manantiales, pozos de las subcuencas y trasvase de la presa Valerio Trujano a algunas áreas agrícolas de INIFAP, Escuela Superior de Agricultura y Planta Potabilizadora, y 2) las salidas por el canal Tuxpan, la evaporación y uso del recurso que se extrajo de forma directa, por lo tanto, la hidrología obtenida es local y regional.

1.6 REFERENCIAS

- BOCCO, G. 2007.** Cartografía y los sistemas de información geográfica en el manejo integrado de cuencas. En: Cotler, H. (Ed.), *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp. 59- 64. México.
- BUDIKO, M.I. 1982.** The Earth's Climate: Past and Future. *International Geophysics Series*. Volume 29. Academic Press, INC. New York
- CAIRE, G. 2007.** Retos para la gestión ambiental de la cuenca Lerma Chapala: Obstáculos institucionales para la introducción del manejo integral de cuencas. En: Cotler, H. (Ed.) *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp.195 – 211. México.
- CASILLAS, G.J.A. 2007.** El programa nacional de microcuencas: una estrategia de desarrollo integral. En: Cotler, H. (Ed.) *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp. 259-275. México.
- COTTLER, H. Y A. PRIEGO. 2007.** El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: El caso de la cuenca Lerma-Chapala. En: Cotler, H. (Ed.) *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp. 59- 64. México.
- CHÁVEZ, Z.G. 2007.** Del gobierno a la gobernabilidad de los recursos hídricos de México. En: Cotler, H. (Ed.) *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología 185 – 193 pp. México.
- DE LA MAZA, J., CARABIAS, L.J. (EDS). 2011.** *Usumacinta bases para una política de sustentabilidad ambiental*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua – Natura y Ecosistemas Mexicanos, A.C., México. 252 pp.
- DÍAZ, D.C., K. MAMADOU, B.A., A. ITURBE P., M.V. ESTELLER A. Y F. REYNA S., 1999.** Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del curso alto del río Lerma, Estado de México. *Ciencias Exactas y Aplicadas. Ciencias ERGO SUM*. Vol. 6 (2): 124 – 135.
- DOUROJANNI, A. C. 2007.** Si sabemos tanto sobre qué hacer en materia de Gestión Integrada del Agua y Cuencas ¿Por qué no lo podemos Hacer? En: Cotler, H. (Ed.) *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp. 149- 183. México.
- ENCICLOPEDIA DE LOS MUNICIPIOS Y DELEGACIONES DE MÉXICO, 2013.** *Guerrero. Iguala*. Disponible en la Web: <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM12guerrero/municipios/12035a.html>. Consultado el 04 de septiembre de 2013.
- GARCÍA COLL, I., A. AVELINO, M., A. RAMÍREZ, A. NIÑO, C., A.J. RIVAS Y L. DOMÍNGUEZ. 2007.** La relación agua-bosque: delimitación de zonas prioritarias para pago de servicios

- ambientales hidrológicos en la cuenca del río Gavilanes, Coatepec, Veracruz. En: Cotler, H. (Ed.) *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp.59- 64. México.
- GARCÍA COLL, I., A. AVELINO, M., A. RAMÍREZ, A. NIÑO, C., A.J. RIVAS Y L. DOMÍNGUEZ.** 2007. La relación agua-bosque: delimitación de zonas prioritarias para pago de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca del río Gavilanes, Coatepec, Veracruz. En: Cotler, H. (Ed.) *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp.59- 64. México.
- GARCIA, E.** 1973. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Instituto de Geografía. UNAM. México.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA.** 2013. *Estudio para la Identificación de las Causas Niveles y Grado de Contaminación Ambiental en la Laguna de Tuxpan, Guerrero y Propuestas para el Tratamiento de las Aguas Residuales Descargadas en Ella y sus Afluentes*. IMTA-CAPASEG. Informe Final. Convenio CCE.01.04.3.0.2013.-0231. México.
- INEGI**, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). *Digetenal*. <http://www.inegi.org.mx/>.
- INEGI**, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013). *Denué Interactivo*. <http://www.inegi.org.mx/>.
- MASS, M.** 2007. La investigación de procesos ecológicos y el manejo integrado de cuencas hidrográficas: Un análisis del problema de escala. En: Cotler, H. (Ed.) *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp.65-78. México.
- MASS, M. Y H. COTTLER.** 2007. El protocolo para el manejo del ecosistema en cuencas hidrográficas. En: Cotler, H. (Ed.) *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp. 21-40. México.
- MIJANGOS, C.M.A, R. GONZALEZ VILLELA, L.A. BRAVO INCLÁN, M. ALBA URIOSTEGUI, B.M. EVANS.** 2015. Estudio de fuentes de contaminación puntual y difusa en las subcuencas del lago de Tuxpan y río Tomatal, Iguala, Gro. México. 2015. *Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México-UACJ*.
- PIPERNO, D.R., J.E. MORENO, J. IRIARTE, I. HOLST, M. LACHNIET, J.G. JONES, A.J. RANERE Y R. CASTANZO.** 2007. Late Pleistocene and Holocene environmental history of the Iguala Valley, Central Balsas Watershed of Mexico. *PNAS* Vol. 104 (9): 11874 – 11881.
- RITTER, W. O., S. GUZMÁN, R., E. BUENDÍA, C. Y T. MORALES, A.** 1979. Sobre la evaluación de los recursos naturales (aspectos ambientales en la productividad oceánica). *Anales del Instituto de Geofísica*. Vol. 25: 135-151.
- RITTER, W. O., S. GUZMÁN, R., N. SÁNCHEZ-SANTILLÁN, J. SUÁREZ, S., C. CORONA V., H. MUÑOZ, N, A. RAMOS, V., R RODRÍGUEZ, M. Y T. E. PÉREZ, E., 2002. WRITTER, O. W., R. KLIMEK, G. Y R. PATIÑO, M., 1997.** Sobre el pronóstico en los sistemas Físico-Climáticos y Biológicos-Productivos, posibilidades y limitaciones. *Revista Geográfica*. No.

123: 203-218.

RITTER, O. W. Y R. PATIÑO. 1997. Flujos y procesos energéticos del clima, la vida y la producción. *Ciencia y Desarrollo*. 23: 59 – 67.

STATSOFT, 2006. *Statistica*. Enterprise-wide Data Mining System. Netherlands.

VALENCIA V.J.C., J.J. DÍAZ N., L. VARGAS M. 2007. La gestión integrada de los recursos hídricos en México: un nuevo paradigma en el manejo del agua. En: Cottler, H. (Ed.) *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp.213 – 258. México.

WETZEL, R.G. 2001. *Limnology*. Lake and River Ecosystems. 3ra Edición. Academic Press. USA.



Contaminación puntual y difusa en las subcuencas de la laguna de Tuxpan y río el Tomatal, Gro.

EDITORES:

Rebeca González Villela.
Marco A. Mijangos Carro.

CONTENIDO

Capítulo 2

2.1 INTRODUCCIÓN	41
2.2 AREA DE ESTUDIO	44
2.3 MÉTODOS	46
2.3.1. <i>Calidad del agua</i>	50
2.3.2. <i>Sitios de muestreo del agua</i>	50
2.3.3. <i>Monitoreo de calidad del agua</i>	52
2.3.4. <i>Muestreo en suelos</i>	52
2.3.5. <i>Modelación en mapshed de la evaluación de fuentes puntuales y difusas</i>	52
2.3.5.1. <i>Ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS)</i>	53
2.3.6. <i>Información para la base de datos de transporte del modelo mapshed</i>	58
2.3.6.1. <i>Estimaciones áreas fuente</i>	58
2.3.6.2. <i>Factor (R) erosividad de la lluvia</i>	60
2.3.6.3. <i>Curva de número (CN)</i>	61
2.3.6.4. <i>Factor (K) erosionabilidad del suelo</i>	63
2.3.6.5. <i>Factor (LS) longitud y pendiente</i>	65
2.3.7 <i>Información requerida para la base de datos de nutrientes del modelo mapshed</i>	67
2.3.7.1. <i>Concentraciones de nutrientes disueltos en el escurrimiento</i>	67
2.3.7.1.2. <i>Concentraciones de nutrientes en el escurrimiento de áreas de abono</i>	67
2.3.7.1.3. <i>Tasas de acumulación de nutrientes en zonas urbanas</i>	67
2.3.7.1.4. <i>Descargas de fuentes puntuales</i>	68
2.3.8 <i>Información requerida para la base de datos de clima del modelo mapshed</i>	68
2.4 RESULTADOS	74
2.5 DISCUSIÓN	83
2.6 REFERENCIAS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.2.1. Localización de las microcuencas del lago "Laguna de Tuxpan" y río El Tomatal (Modificada de IMTA 2013).	45
Figura 2.3.1. Ubicación de las estaciones de muestreo de agua (Modificada de IMTA 2013)	51
Figura 2.3.2. Diagrama de flujo metodológico para la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) (Modificada de IMTA 2013).	55
Figura 2.3.3. Delimitación de dos subcuencas: Laguna de Tuxpan y río Tomatal (Modificada de IMTA 2013).	57
Figura 2.3.4. Mapa de cobertura de uso del suelo generalizado derivado para el modelo MapShed (Modificada de IMTA 2013).	59
Figura 2.3.5. Mapa del Factor R, erosividad del suelo de la EUPS, derivado del modelo MapShed (Modificada de IMTA 2013).	60
Figura 2.3.6. Mapa de Grupos hidrológicos derivado de la edafología para el modelo MapShed (Modificada de IMTA 2013)	62
Figura 2.3.7. Mapa del Factor K, erosionabilidad del suelo de la EUPS, derivado del modelo MapShed (Modificada de IMTA 2013).	64
Figura 2.3.8. Mapa de los Factores (LS), longitud y pendiente del terreno de la EUPS, del modelo MapShed (Modificada de IMTA 2013).	66
Figura 2.3.9. Cargas puntuales de nutrientes de localidades en microcuencas (Modificada de IMTA 2013).	71
Figura 2.3.10. Mapa de la distribución de las estaciones climatológicas (Modificada de IMTA 2013).	73
Figura 2.4.1. Promedios mensuales de balance hídrico (Modificada de IMTA 2013).	74
Figura 2.4.2. Promedio mensual de las cargas de erosión y sedimento (Modificada de IMTA 2013).	75
Figura 2.4.3. Promedios mensual de cargas de Nitrógeno y Fósforo (Modificada de IMTA 2013).	76
Figura 2.4.4. Fuentes por Nitrógeno (Modificada de IMTA 2013).	76
Figura 2.4.5. Fuentes por Fosforo (Modificada de IMTA 2013).	76
Figura 2.4.6. Promedio anual de cargas de Patógenos (Modificada de IMTA 2013).	77
Figura 2.4.7. Rendimiento por microcuenca de erosión y sedimento (Modificada de IMTA 2013).	77
Figura 2.4.8. Carga anual de nutrientes por microcuencas (Modificada de IMTA 2013).	78

Figura 2.4.9. Patrón de uso del suelo en las microcuencas del lago de Tuxpan y río Tomatal (Modificada de IMTA 2013).	80
Figura 2.4.10. Contribución de Nitrógeno total por uso del suelo de fuentes no puntuales (Modificada de IMTA 2013).	81
Figura 2.4.11. Contribución de Fósforo total por uso del suelo de fuentes no puntuales (Modificada de IMTA 2013).	81

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 2.3.1. Información general sobre las capas de datos SIG empleados en MapShed	49
Cuadro 2.3.2. Localización de las estaciones de muestreo	50
Cuadro 2.3.3. Clasificación de microcuencas	56
Cuadro 2.3.4. Cobertura de vegetación y uso de suelo total de las dos subcuencas	58
Cuadro 2.3.5. Clases y rangos del Factor R, erosividad del suelo	61
Cuadro 2.3.6. Cargas puntuales de nutrientes de localidades en microcuencas	68
Cuadro 2.3.7. Estaciones climatológicas en las subcuencas de la Laguna de Tuxpan y Río Tomatal	72
Cuadro 2.4.1. Cargas puntuales y difusas por microcuenca.	78
Cuadro 2.4.2. Promedio de cargas por fuentes de Nitrógeno total y Fósforo total	80
Cuadro 2.4.3. Contribución de Fósforo total por uso del suelo de fuentes no puntuales	82

2.1 INTRODUCCIÓN

Desde los años 1950's los agricultores a pequeña escala utilizaban fertilizantes orgánicos para la producción de autoconsumo. En esencia, la basura producida era asimilada por el suelo y los cuerpos de agua sin ningún problema. Posteriormente, se pasó al monocultivo y los campos se incrementaron drásticamente para satisfacer la creciente demanda. Los agricultores comenzaron a aplicar gran cantidad de fertilizantes y pesticidas sintéticos al mismo tiempo que la deforestación arrasó los bosques a partir de 1950, para abrir zonas de cultivo y zonas urbanas. Ocurrió una migración masiva de población rural hacia las ciudades en desarrollo, y se degradó la calidad del agua superficial y subterránea debido:

- a) A la degradación debida a la conversión del uso de la tierra en áreas agrícolas;
- b) Al incremento de la erosión y la pérdida de suelos por las prácticas agrícolas;
- c) A la contaminación química por los pesticidas y fertilizantes, y
- d) A la contaminación de tipo pecuaria (Novotny, 1999 y 2003).

La contaminación difusa se debe a las fuentes no puntuales (filtración de nitratos de la agricultura hacia las aguas subterráneas), y los efluentes puntuales de los campos de cultivo y de las zonas urbanas, que en conjunto contaminan significativamente al agua superficial. La movilización de los contaminantes depende de las condiciones climáticas y se ve influenciada por el tipo de suelo y la cubierta vegetal. La contaminación difusa esta asociada con fuentes dispersas, las cuales pueden convertirse en un riesgo ambiental (Campbell et al. 2006).

La contaminación difusa frecuentemente enriquece de nutrientes los sedimentos y azolva los reservorios de uso recreativo, impactos especialmente significativos en el agua dulce. Los tóxicos pueden ser intermitentes y difíciles de

identificar, como los insecticidas que contaminan los escurrimientos en las áreas rurales de la porción alta de las cuencas. En el desagüe ciudadano la contaminación combina aceites, solventes y metales asociados al tráfico vehicular, y pesticidas y otros químicos de origen industrial de aplicación y/o producción municipal.

En algunos lugares, la cobertura del sistema de alcantarillado es insuficiente y la contaminación es no puntual. En localidades pequeñas, las viviendas no tienen drenaje y las excretas se depositan en letrinas o fosas sépticas en los patios traseros, aumentando el riesgo de contaminación del subsuelo y acuíferos, al mismo tiempo que la lluvia arrastra contaminantes por la superficie a ríos, arroyos, lagos y presas.

En muchas partes la erosión amenaza la sostenibilidad de la agricultura, mientras que los asentamientos humanos son la mayor amenaza para la salud pública. El impacto es mayor en las escorrentías y cuerpos de agua de las ciudades donde la infraestructura para el manejo de la basura es escasa (Campbell et al. 2006).

Todos los cuerpos de agua superficiales, como el océano, lagos, lagunas y presas, son los receptores finales de los contaminantes puntuales y difusos, por lo que en años recientes surge el interés de construir embalses o presas que minimicen el impacto de los contaminantes en los cuerpos de agua naturales localizados corriente abajo. Las presas grandes retienen muchos nutrientes de los ríos (Caraco y Cole 1999), en el caso del N mediante la denitrificación, y en el caso del P la sedimentación (Hamborg et al. 1997).

Los datos publicados indican acumulaciones de 10×10^3 t/año de N total, y de $1,7 \times 10^3$ t/año de P total, equivalentes a una retención total del 5% y 10%, respectivamente, en la presa “Iron Gate 1” (Teodoru y Wehrli 2006). La presa retiene más del 50% de los sólidos suspendidos entrantes (excluyendo resuspensión por eventos extremos).

En la parte baja del río Palmones (España), la presa que controla las cargas de nutrientes al estuario, retiene en promedio más del 25% del P total, pero no se observó eliminación neta de N total durante el período estudiado (Avilés y Niell 2007). En la presa Jeziorsko, alimentada principalmente por el río Warta, se observó que retiene del 49.5% al 77.7 % de N y del 42.6 al 51.7 % del P (Wierzbicki y Anteck 2003).

El lago Balaton presenta problemas graves de eutroficación por las descargas del río Zala, de 50 t/año de P disuelto y 40 t/año de P particulado. Experimentos en invierno demostraron que el P particulado y disuelto, fue retenido en el embalse en un 87% y 49%, respectivamente, dando una retención total del 70% (Herodek y Zlinsky 1990).

En el norte de Nuevo México, el embalse Abiquiu retiene el 46% del N y el 48% del P, mientras que el embalse de Cochitit, la retención fue del 55% de N y 55% de P durante la baja escorrentía (Johnson y Barton 1985).

En México se necesita un diagnóstico que muestre la magnitud de la entrada de contaminantes conducidos por la lluvia que escurre a los cuerpos de agua. En los países en desarrollo y otras áreas de captación, la contaminación difusa es más importante que la generada por las descargas puntuales, pues no tienen bien definida la diferencia entre fuente puntual y no puntual.

En las áreas urbanas de las subcuencas de la Laguna de Tuxpan y río El Tomatal, no hay sistema de alcantarillado o está en mal estado, y la acumulación de desechos urbanos representa un problema no puntual que impacta significativamente la calidad del agua de los cuerpos receptores. Por lo tanto, en el presente estudio se evalúa y jerarquiza la contaminación puntual y difusa utilizando el modelo MapShed “Función de Carga Generalizada en Cuenca” (GWLF), para estimar y determinar las cargas de nutrientes y la sedimentación, así como para identificar y jerarquizar la erosión y la contaminación puntual y difusa en nueve microcuencas asociadas al lago.

2.2 ÁREA DE ESTUDIO

Las subcuencas de la “Laguna de Tuxpan” y río El Tomatal, se localizan en el municipio de Iguala, Edo. de Guerrero, al sur de México, entre las coordenadas $18^{\circ} 24' 29.13''$ y $18^{\circ} 17' 13.33''$ N y $99^{\circ} 31' 59.17''$ y $99^{\circ} 26' 59.32''$ W. Pertenecen a la Región Hidrológica No. 18, con una superficie total de 68.68 km^2 . El lago es un cuerpo natural de aguas interiores y el colector principal de la subcuenca de Tuxpan, rectificado o reencauzado por el lado de la subcuenca del río Tomatal. Su perímetro es de aproximadamente 8.5 km, con una longitud de 2.8 km y una anchura de 1.9 km. Las subcuencas se dividen en seis para el Lago de Tuxpan y tres para el río Tomatal, dando un total de nueve microcuencas (Figura 2.2.1). Las subcuencas en estudio presentan afluentes formados por escurrimientos torrenciales, destacando algunos arroyos semipermanentes como La Virgen, La Hacienda y La Gloria, del lado de la subcuenca de Tuxpan, y el único río que le da nombre a la subcuenca de El Tomatal. Permiten definir nueve microcuencas y, en su conjunto, descargan directamente hasta la Laguna de Tuxpan (Cuadro 2.2.1 y Figura 2.2.1).

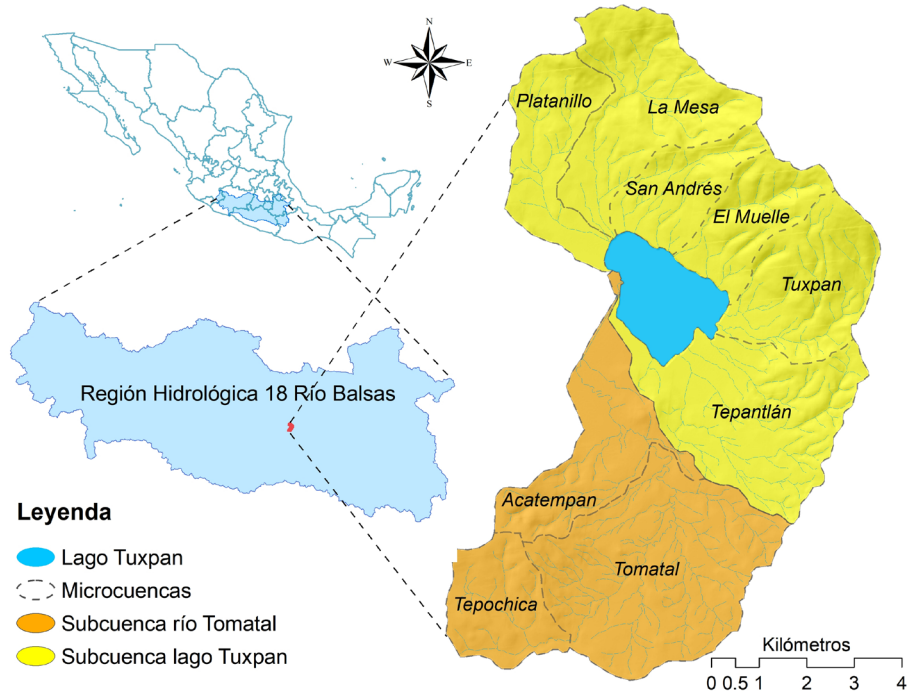


Figura 2.2.1. Localización de las microcuencas del lago de Tuxpan y río Tomatal (Modificada de IMTA 2013).

2.3 MÉTODOS

El análisis de la información se basó en sistemas de información geográfica (GIS), que es la alternativa idónea para manipular gran cantidad de información espacial y temporal, porque se ha logrado unir a diversos modelos de contaminación difusa (interface). El GWLF, ó Función Generalizada de Cargas en Cuenca (Haith y Shoemaker 1987), es un modelo sencillo que permite obtener resultados razonables con poca información, puede determinar los cambios estacionales de las cargas de nutrientes y probar la efectividad de las medidas de control de la contaminación por fuentes no puntuales. El IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), lo aplica desde 1999 para estimar la carga mensual de nutrientes en varias subcuencas (río Apatlaco en Morelos, IMTA 2000; Gómez et al. 2007); lago de Pátzcuaro, Mich. (IMTA 2003; Mijangos et al. 2008), lago de Cuitzeo (Izurieta et al. 2005 y 2007), y parte baja del río Lerma (IMTA 2005; 2007a y 2007b; Mijangos et al. 2009 y 2010).

El MapShed modela cuencas mediante una aplicación del software AV-GWLF a un SIG (Evans et al. 2002). Proporciona un vínculo entre el software del SIG y una versión mejorada del modelo de cuenca GWLF, similar a AVGWLF (Evans y Corradini 2012). Estima varios parámetros del modelo crítico a partir de bases de datos local/regional con variabilidad espacial significativa, y construye conjuntos de datos con formato vectorial raster (shapefiles y grids), compatibles con MapShed, así como con Geo-Tiffs, que se utilizan en este entorno. Si bien se diseñó en el Instituto de Energía y Medio Ambiente de Pensilvania (PSIEE), para usarse localmente, se ha modificado para permitir el uso en otras áreas. Concretamente, se le incluyó funcionalidad para cargar datos y condiciones establecidas por el usuario (Evans y Corradin 2012).

MapShed crea una interface para introducir los datos. Se identifican los archivos requeridos por el SIG que proporcionan información para el modelo de cuenca “no espacial”. Con esta información se obtienen los valores de los

parámetros de entrada del modelo necesarios para la ejecución del mismo (clima regional “tiempo” en los archivos de Excel, para una simulación dada de cuencas). MapShed, selecciona las áreas de interés, crea los archivos de entrada al modelo, ejecuta un modelo de simulación y entrega una serie de medidas integradas.

MapShed utiliza el modelo GWLF- E, que está respaldado por la EPA (Agencia de Protección al Ambiente) como un buen modelo “de nivel medio”, para simular las cuencas núcleo. Contiene algoritmos para simular la mayor parte de los mecanismos de nutrientes clave y el control de flujos de sedimentos en una cuenca (USA–EPA 1999). Se basa en el modelo GWLF amigable e independiente de los datos de entrada (Deliman et al. 1999).

MapShed es un modelo de simulación continua que utiliza datos meteorológicos diarios y los cálculos del balance hídrico para simular el escurrimiento y las cargas de sedimentos y nutrientes (N y P) de una cuenca y las zonas de origen (agricultura, forestal y suelo urbanizado) de tamaño variable. También dispone de algoritmos para el cálculo de las cargas de sistemas sépticos y permite la inclusión de datos de descargas puntuales. Realiza los cálculos mensuales de sedimentos y cargas de nutrientes basado en el equilibrio de agua diaria acumulada mensualmente, considerando que los parámetros en el modelo de la cuenca tiene un comportamiento distribuido/agrupado combinado.

El modelo considera que la carga de superficie supone el uso múltiple del suelo/cobertura en varios escenarios, y que cada zona es homogénea respecto a los “paisajes”/ atributos considerados. Además, el modelo implementa agregados de las cargas de cada área de origen en el total de cuencas hidrográficas.

Para la carga sub-superficial, el modelo actúa como un modelo de parámetros agrupados. No hay zonas claramente diferenciadas y se consideran las contribuciones de las corrientes freáticas. El balance hídrico diario se calcula para una zona no saturada, así como una zona de sub-superficie saturada, donde la infiltración se calcula como la diferencia entre la precipitación menos escurrimiento superficial, más evapotranspiración.

MapShed simula el escurrimiento superficial usando el SCS–CN de las entradas diarias de temperatura y precipitación. La erosión y los sedimentos se calculan usando los valores de erosión mensuales basados en el algoritmo de la

USLE (Universal Soil Loss Equation) con coeficientes mensuales de precipitación-escorrimento y unos valores KLSCP mensuales para cada área de origen (ecuación para evaluar la pérdida de suelo): cobertura del suelo/combinación del suelo; tasa de sedimentación en función del tamaño de las cuencas; capacidad de transporte sobre la base del escurrimiento diario promedio aplicada a la erosión; producción de sedimentos para cada área de origen; pérdidas de nutrientes de superficie determinadas por la aplicación de coeficientes de N y P disueltos en los escurrimientos superficiales; y un coeficiente de sedimentos proporcional para cada área de origen agrícola.

Los vertidos de fuentes puntuales contribuyen a las pérdidas por disolución y se especifican en kilogramos por mes. También considera a los sistemas sépticos y las áreas abonadas. Los aportes de nutrientes urbanos en fase sólida, son utilizados por el modelo como acumulación exponencial. Las pérdidas superficiales se calculan utilizando los coeficientes de N y P disueltos en la corriente de agua superficial como cargas de nutrientes, y la subterránea considera una única área de contribución de parámetros concentrados. La evapotranspiración se determina de datos meteorológicos diarios y el factor de cobertura depende del uso de suelo y tipo de cubierta vegetal.

La rutina de balance hídrico original dentro MapShed simula la extracción de agua de la superficie y de agua subterránea. La información contenida en la “extracción de agua” estima el volumen de agua por mes y para cada capa de SIG. La extracción de agua por superficie y el volumen de agua acumulada estimada se restan de la simulación “Caudal”, componente de los cálculos mensuales del balance hídrico. Para los retiros de las aguas subterráneas, este volumen se resta de la componente “subsuelo” del agua mensual.

La simulación de la hidrología y cargas de las zonas urbanas utiliza las rutinas más complejas para una gama amplia de condiciones del paisaje urbano basadas en el modelo desarrollado por RUNQUAL de la Universidad de Cornell (Haith et al. 1992), para la simulación diaria continua del escurrimiento superficial y las cargas de contaminantes de suelo urbanizado dentro de una cuenca determinada. Los flujos y las cargas son calculados a partir de las fracciones tanto permeables e impermeables asociadas con cada categoría uso del suelo/cubierta utilizada. El escurrimiento contaminado es redirigido a través del modelo

BMP's (Best Management Practices, BMP's) o Mejores Prácticas de Conservación Urbana, con el fin de simular las reducciones que pueden ocurrir antes de ser dados de alta en la salida de la cuenca.

Los volúmenes de escurrimiento se calculan mediante el procedimiento indicado en el reporte técnico 55 del Servicio de Conservación del Suelo (SCS, USA 1986). Las Cargas contaminantes se basan en la acumulación exponencial y funciones similares a las utilizadas en el SWMM (Huber y Dickinson 1988) y STORM (Centro de Ingeniería Hidrológica 1977). La fracción permeable e impermeable de cada tipo de uso del suelo se modela por separado. Los escurrimientos y cargas contaminantes de las distintas superficies son calculados diariamente y agregados mensualmente en los resultados del modelo. El Cuadro 2.3.1, proporciona una lista y una breve descripción de las capas SIG necesarias y opcionales utilizadas.

Cuadro 2.3.1. Información general sobre las capas de datos SIG empleados en MapShed

Información de capas	Descripción
Archivos Shape	
Estaciones meteorológicas	Ubicación de las estaciones meteorológicas
Fuentes fijas	Ubicaciones de descarga de fuentes puntuales
Extracción de agua	Lugares de extracción de agua
Cuencas	Cuenca límite utilizada para modelar
Caudales	Mapa de la red de corriente
Carreteras sin pavimentar	Mapa de carreteras sin pavimentar
Carreteras	Mapa de la red de carreteras (líneas)
Municipio	Límites County - para datos USLE
Sistemas sépticos	Número de sistemas sépticos y tipos
Suelos	Contiene diversos datos relacionados con el suelo
Provincias fisiográficas	Contiene datos de parámetros hidrológicos
Áreas urbanas	Mapa de los límites del área urbana (polígonos)
Líneas de flujo	Longitudes de flujo de sub-áreas a salida de la cuenca
Archivos Grd	
Uso del Suelo y Vegetación	Mapa de uso del suelo/cubierta (20 clases)
Elevación	Modelo Digital de Elevación
N en agua subterránea	Antecedentes estimación de N en mg/L
P en Suelo	Estimación de P en el suelo en mg/kg (P medido o estimado)

2.3.1 Calidad del agua

El monitoreo de calidad del agua en las dos subcuencas (Tuxpan y Tomatal) se realizó en época de lluvias y otro en la época de secas, con información de los escurrimientos torrenciales, algunos arroyos semipermanentes, pozos y el río El Tomatal.

2.3.2 Sitios de muestreo del agua

Se establecieron un total de veintiséis sitios de muestreo alrededor del lago y sobre el cauce del río para la evaluación de la calidad del agua. Dichas estaciones se presentan en la Cuadro 2.3.2 y Figura 2.3.1

Cuadro 2.3.2. Localización de las estaciones de muestreo

Estación	Nombre	Tipo de muestra	Latitud N	Longitud O	Altitud (msnm)
1	Río Tomatal 1	Río	18°19'12.6"	99°29'20.5"	798
2	Río Tomatal 2	Río	18°19'17.9"	99°29'24.7"	785
3	Descarga 1 Río Tomatal	Río	18°19'24.0"	99°29'24.5"	784
4	Descarga 2 Río Tomatal	Río	18°19'16.4"	99°29'37.9"	797
5	Descarga 3 Río Tomatal	Río	18°19'16.4"	99°29'48.0"	804
6	Río Tomatal 3	Río	18°19'46.1"	99°29'39.5"	780
7	Río Tomatal 4	Río	18°20'28.0"	99°30'24.8"	767
8	Río Tomatal 5	Río	18°20'47.37"	99°30'20.80"	760
9	INIFAP	Río	18°20'46.10"	99°30'21.82"	760
10	San Andrés	Escurrimiento	18°21'40.28"	99°29'3.30"	760
11	La Virgen	Arroyo	18°20'39.13"	99°28'43.88"	760
12	La Hacienda	Arroyo	18°20'28.57"	99°29'2.48"	760
13	La Gloria	Arroyo	18°20'32.94"	99°29'10.74"	760
14	El Potrero	Arroyo	18°22'24.18"	99°30'15.30"	777
15	Panteón II	Arroyo	18°22'48.66"	99°30'20.94"	760

16	El Platanillo	Manantial	18°23'59.34"	99°29'47.76"	1047
17	Tonalapa del Norte	Pozo	18°22'3.78"	99°30'42.06"	770
18	Tepochica	Pozo	18°18'4.50"	99°31'32.46"	960
19	Rancho del Cura	Pozo	18°17'40.20"	99°30'49.44"	900
20	Tomatal	Pozo	18°19'24.90"	99°29'49.08"	810
21	San José	Pozo	18°20'56.40"	99°28'43.86"	760
22	El Muelle	Pozo	18°21'50.58"	99°29'24.90"	760
23	La Palma	Pozo	18°18'14.04"	99°30'8.94	860
24	El Panteón	Pozo	18°22'48.60"	99°30'20.94"	810
25	San Andrés	Pozo	18°21'29.03"	99°28'49.98"	787
26	La Virgen	Pozo	18°20'42.98"	99°29'16.32"	740

Fuente: Modificada de IMTA 2013

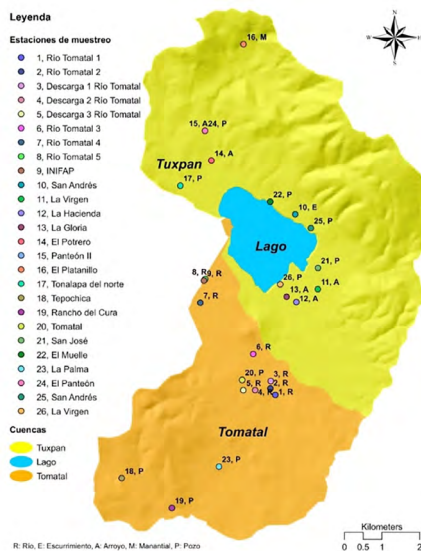


Figura 2.3.1. Ubicación de las estaciones de muestreo de agua (Modificada de IMTA 2013).

Fuente: INEGI (2013) Continuo de Elevación Mexicano 3.0. IMTA (2013) Muestreo y análisis de aguas superficiales y subsuperficiales.

2.3.3 Monitoreo de calidad del agua

Se analizaron los parámetros fisicoquímicos de acuerdo a los Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua CE-CCA-001/89 y Uso 3 (Laboratorio de Calidad del Agua del IMTA). Fisicoquímicos 1 (FQ1): Sólidos Totales (mg/L), Sólidos Suspendidos Totales (mg/L), Sólidos Disueltos Totales (mg/L), Fósforo (Orto) y Fósforo Total (mg/L). Fisicoquímicos 2 (FQ2): Nitrógeno Orgánico, Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno Total Kjeldahl y Nitrógeno de Nitritos más Nitratos en mg/L. Microbiológicos: Coliformes Fecales y Totales (NMP/100 mL). Otras variables ambientales mediante un equipo Hanna modelo HI 9828 (pH, concentración de oxígeno (mg/L), conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), potencial redox (mV), turbidez (NTU), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y el caudal (m^3/s) con un equipo FlowMate.

2.3.4 Muestreo en suelos

El MapShed estima el aporte de fósforo no disuelto por cobertura de suelo, con base en los cálculos de erosión hídrica y tomando la información de concentración de fósforo superficial de una capa digital en formato raster, por lo que para conocer la cantidad de fósforo contenida en la capa superficial de suelo (primeros 20 centímetros), se realizó un levantamiento de suelo en 20 sitios, y las muestras se procesaron en el Instituto de Recursos Naturales en el área de Edafología del Colegio de Posgraduados de Chapingo.

2.3.5 Modelación en mapshed de la evaluación de fuentes puntuales y difusas

El contenido de nutrientes en una corriente puede estar en forma disuelta, asociado con el escurrimiento y el aporte de agua subterránea, o suspendida, por erosión del suelo y en el aporte por fuentes puntuales de áreas urbanas a la corriente. El MapShed describe las fuentes difusas simulando el escurrimiento, la erosión, el aporte de áreas urbanas y de agua subterránea. Las fuentes puntuales se consideran como cargas de masa constante que se suponen conocidas. El balance

de agua se calcula con los datos de precipitación diaria. En seguida, el modelo estima los caudales mensuales, transporte de sedimentos y el flujo de nutrientes, suponiendo que el tiempo de viaje es mucho menor a un mes.

La carga mensual de nitrógeno y fósforo en la corriente está dada por:

$$LD_M = DP_M + DR_M + DG_M + DS_M$$

$$LS_M = SP_M + SR_M + SU_M$$

LD_M = Carga de nutrientes en fase disuelta

LS_M = Carga de nutrientes en fase sólida

DP_M = Carga de nutrientes de fuentes puntuales en fase disuelta

DR_M = Carga de nutrientes del escurrimiento rural en fase disuelta

DG_M = Carga de nutrientes de aguas subterráneas en fase disuelta

DS_M = Carga de nutrientes de sistemas sépticos en fase disuelta

SP_M = Carga de nutrientes de fuentes puntuales en fase sólida

SR_M = Carga de nutrientes de escurrimiento rural en fase sólida

SU_M = Carga de nutrientes de áreas urbanas en fase sólida

2.3.5.1 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS)

El agua y el viento son los agentes naturales que más participan en la remoción del suelo. El desprendimiento, transporte y deposición de partículas del suelo, es un proceso natural que desgasta gradualmente a las montañas y forma valles aluviales. Es posible distinguir dos tipos de erosión, la hídrica y la eólica, definidas por el agente erosivo actuante, lluvia o viento. La erosión acelerada por la acción del hombre estimula una lucha constante para encontrar métodos adecuados para estimar la degradación, como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), diseñada para predecir la erosión hídrica anual promedio mediante un modelo paramétrico que incluye factores como erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), longitud de la pendiente (L), grado de la pendiente (S), manejo de cultivos (C) y las prácticas mecánicas (P) que se realizan en el terreno.

El golpeteo de la lluvia sobre la superficie desnuda, proyecta las partículas del suelo al aire a distancias variables. La severidad depende de la cantidad desprendida y de la capacidad de transporte del agente erosivo. La erosión limitada por desprendimiento se presenta si el agente puede transportar más material que el que se abastece. En el caso contrario, está limitada por la capacidad de transporte (Figueroa et al. 1991).

La EUPS propuesta en 1959 (Wischmeier et al. 1971; Wischmeier y Smith 1978), ha expandido su uso para entender y para desarrollar modelos fundamentales capaces de predecir la pérdida y deposición de suelo de una tormenta específica (Cortés 2000).

Figueroa et al. (1991), proponen que la EUPS puede usarse para los fines siguientes:

- Predecir la pérdida anual promedio de suelo de un terreno con pendiente bajo un uso específico de suelo.
- Seleccionar sistemas de manejo, cultivos y prácticas de conservación para pendientes y suelos específicos.
- Predecir los cambios en pérdida de suelo que ocurrirían al darse un cambio en prácticas de cultivo o conservación para un terreno dado.
- Determinar cómo se pueden aplicar o modificar las prácticas de conservación para aplicar un uso más intensivo del terreno.
- Estimar las pérdidas de suelo para terrenos diferentes a los agrícolas.
- Estimar la pérdida de suelo para determinar necesidades de conservación para los conservacionistas.

La ecuación básica ajustada para las condiciones de México es:

$$A = RKLSCP$$

Donde:

A = pérdida de suelo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$)

R = factor erosividad de la lluvia ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ año^{-1}$)

K = factor erosionabilidad del suelo ($t\ ha\ h\ ha^{-1}\ Mj^{-1}\ mm^{-1}$)

L = factor longitud de la pendiente (adimensional)

S = factor grado de la pendiente (adimensional)

C = factor uso y manejo del suelo y vegetación (adimensional)

P = factor de prácticas mecánicas (adimensional).

Los factores involucrados en la EUPS, se ordenan con base en su rango de variación y el orden de importancia: 1) factor de cobertura vegetal y manejo del suelo y, 2) erosividad de la lluvia, 3) grado y longitud de la pendiente, 4) erodabilidad del suelo, y 5) prácticas de conservación, cuyo rango es el más estrecho (Figura 2.3.2).

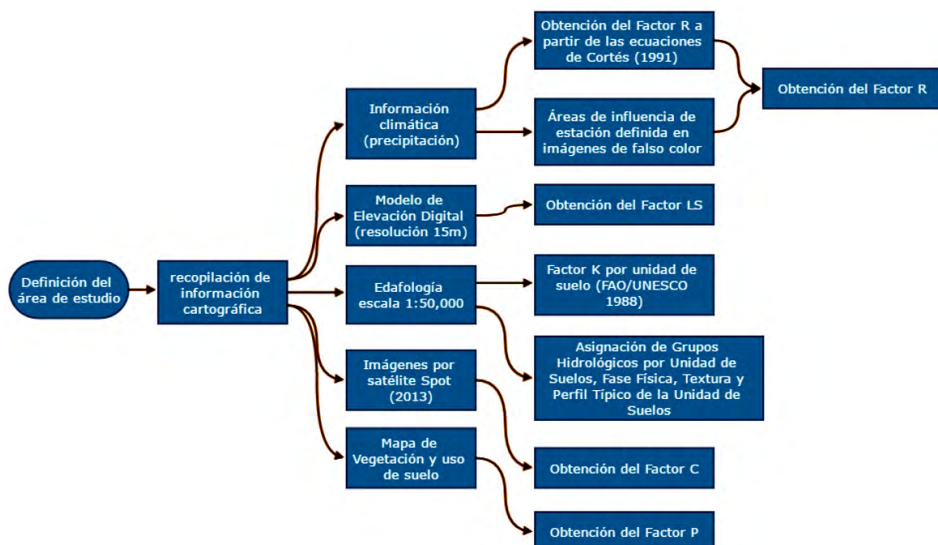


Figura 2.3.2. Diagrama de flujo metodológico para la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) (Modificada de IMTA 2013). Fuente: IMTA. (2013) y Figueroa, et al., (1991) Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión.

Para poder empatar la EUPS al MapShed se tuvo que preparar la información cartográfica escala 1:50,000 de diferentes fuentes, como datos vectoriales de la carta topográfica, los mapas temáticos y el Modelo de Elevación Digital de INEGI, la imagen por satélite, la base de datos del CLICOM de datos diarios de temperatura y precipitación del Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA y los censos agrícolas y pecuarios de la SAGARPA. En el Cuadro 2.3.3 y Figura 2.3.3, se muestra la clasificación y delimitación de las microcuencas para este estudio.

Cuadro 2.3.3. Clasificación de microcuencas

ID	Subcuencas	Microcuencas	Superficie (ha)	(%)
1		Platanillo	540.59	7.87
2		La Mesa	863.24	12.57
3	Tuxpan	San Andrés	396.05	5.77
4		El Muelle	429.03	6.25
5		Tuxpan	673.13	9.80
6		Tepantlán	673.13	15.81
7	Tomatal	Tomatal	1404.33	20.45
8		Tepochica	445.73	6.49
9		Acatempan	665.14	9.69
10		Laguna de Tuxpan	364.56	5.31
		Total	6867.59	100

Fuente: Modificada de IMTA 2013



Figura 2.3.3. Delimitación de dos subcuencas Laguna de Tuxpan y río Tomatal (Modificada de IMTA 2013).
Fuente: INEGI (2013) Continuo de Elevación Mexicano 3.0. INEGI (1993) Conjunto de datos vectoriales Escala 1: 50,000 Carta E14A78. IMTA. (2013) Delimitación del parteaguas de las subcuencas Laguna de Tuxpan y río El Tomatal.

2.3.6 Información para la base de datos de transporte del modelo Mapshed

2.3.6.1 Estimaciones áreas fuente

Para estimar adecuadamente la hidrología y las cargas de nutrientes dentro de una cuenca, es necesaria la extensión de las diferentes “áreas fuente” (las subunidades de suelo se definen por los diferentes usos del suelo/tipos de cobertura). Con MapShed, la extensión de diferentes áreas fuente se calcula mediante el uso de suelo/capas de cubierta. Un ejemplo de la capa de datos raster usado para el modelado se muestra en la Cuadro 2.3.4 y Figura 2.3.4. Esta capa de datos en particular fue creado por el procesamiento de imagen Spot año 2013.

Cuadro 2.3.4. Cobertura de vegetación y uso de suelo total de las dos subcuencas

Vegetación y uso del suelo	Superficie (ha)	(%)
Agricultura	1390.39	20.25
Banco materiales	2.26	0.03
Bosque de encino	21.52	0.31
Bosque de galería	106.77	1.55
Cárcavas	176.58	2.57
Cauces	10.40	0.15
Cuerpo de agua	346.72	5.05
Frutales	201.78	2.94
Hidrófitas	9.62	0.14
Infraestructura	53.02	0.77
Matorral	182.93	2.66
Selva baja caducifolia	3752.12	54.64
Suelo desnudo	3.77	0.05
Zona Urban	609.70	8.88
Total	6867.59	100

Fuente: Modificada de IMTA 2013

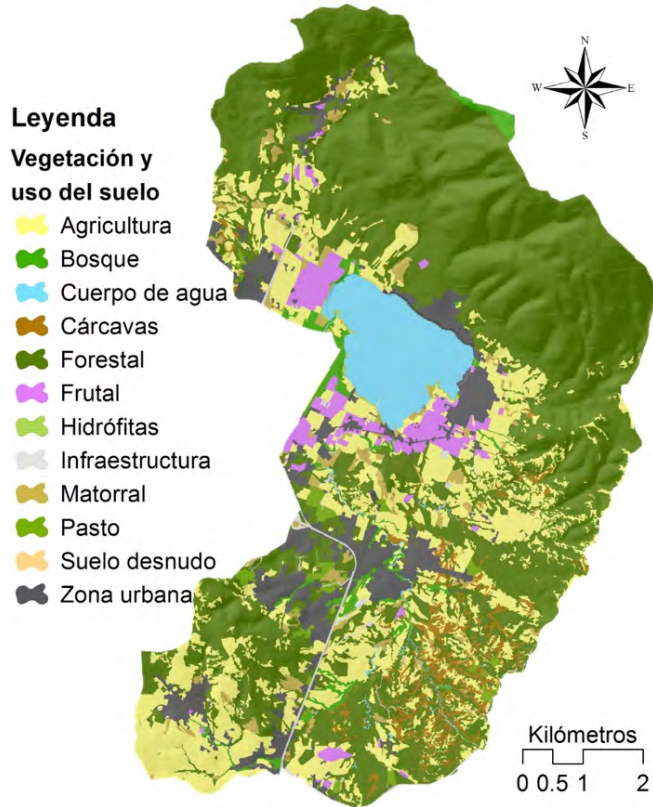


Figura 2.3.4. Mapa de cobertura de uso del suelo generalizado derivado para el modelo MapShed (Modificada de IMTA 2013). Fuente: INEGI (2013) Continuo de Elevación Mexicano 3.0. Imagen Spot (2013). Vegetación y uso del suelo.

2.3.6.2 Factor (R) Erosividad de la lluvia

Partiendo del mapa de erosividad de la lluvia de la República Mexicana (Figuroa et al. 1991), se generó el mapa del Factor Erosividad de la lluvia de las subcuencas de Laguna de Tuxpan y río El Tomatal que forma parte de la región VIII de acuerdo a la división hecha por el mismo autor (Figura 2.3.4).

A cada polígono se le asignó el valor de R obtenido en la estación meteorológica de influencia, de tal forma que el valor mínimo de R fue de 4,000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ y el valor máximo es de 6,900 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, mientras más alto es este valor mayor es el poder erosivo que tiene la lluvia en una cierta zona (Cuadro 2.3.5 de las clases y los rangos en que se encuentra la zona de estudio).

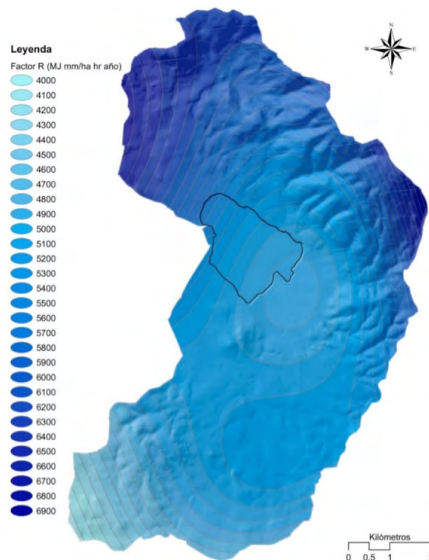


Figura 2.3.5. Mapa del Factor R, erosividad del suelo de la EUPS, derivado del modelo MapShed (Modificada de IMTA 2013). Fuente: INEGI (2013) Continuo de Elevación Mexicano 3.0. SMN-CONAGUA (2012) Estaciones climatológicas. Cortés (1991) Erosión Hídrica. IMTA (2003) Calculo del Factor R de la EUPS.

Cuadro 2.3.5. Clases y rangos del Factor R, erosividad del suelo

Clase	MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ año ⁻¹
Muy baja	< 500
Baja	500 - 1000
Mediana	1000 - 3000
alta	3000 - 6000
Muy alta	> 6000

Fuente: Modificada de IMTA 2013

2.3.6.3 Curva de Número (CN)

La Curva de Número, son valores empíricos usados en estudios de simulación de cuencas que reflejan las cantidades relativas de escurrimiento superficial e infiltración que ocurren en un lugar determinado (SCS 1986; Figura 2.3.6). Los valores se asignan con base en diferentes combinaciones de suelo y uso del suelo/tipo de cobertura. Para esta aplicación, la información sobre el tipo de suelo (en particular, grupo hidrológico del suelo), se obtiene de una aplicación de los datos de suelos. Dentro de MapShed, esta información se combina con el uso de suelo/mapa de cobertura antes mencionada para estimar el tamaño de Curva de Número, para cada área fuente en una cuenca hidrográfica.

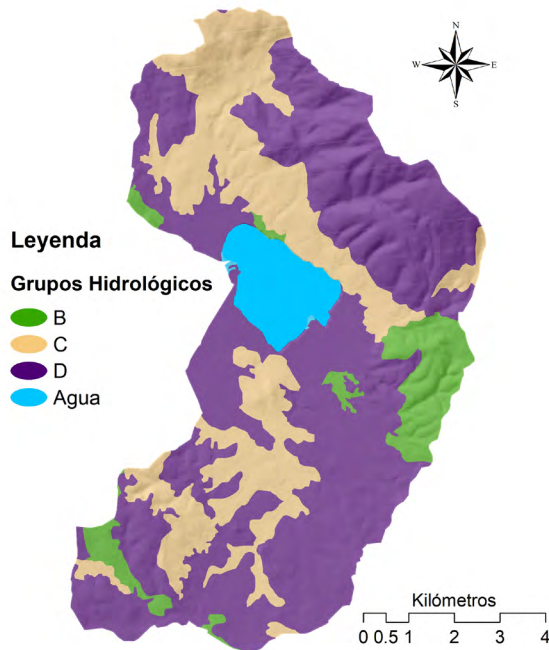


Figura 2.3.6. Mapa de Grupos hidrológicos derivado de la edafología para el modelo MapShed (Modificada de IMTA 2013). Fuente: INEGI (2013) Continuo de Elevación Mexicano 3.0. INEGI (1980) Carta edafológica escala 1:50,000. IMTA (2013) Grupos Hidrológicos.

La carga de nutrientes en el agua del cauce se compone de las fases particulada y disuelta. Las partículas provienen de fuentes puntuales, la erosión del suelo y del lavado de materiales en las zonas urbanas. Los nutrientes disueltos están relacionados con el escurrimiento superficial, las fuentes puntuales y el subsuelo (subterráneas). Dentro de MapShed, las cargas de las numerosas fuentes puntuales de zonas no urbanas y la erosión se consideran homogéneas respecto al suelo y al tipo de cobertura. La carga disuelta se obtiene multiplicando el volumen de cada fuente puntual por la concentración de nitrógeno y fósforo disuelto, o la concentración de nitrógeno predeterminada en MapShed (Haith et al. 1992; Evans et al. 1994).

Las cargas de fósforo disuelto se calculan utilizando las relaciones desarrolladas entre la concentración de fósforo prueba en el suelo y fósforo disuelto en el escurrimiento superficial descrito por Vadas et al. (2005). La concentración de fósforo disuelto en el escurrimiento se calcula utilizando la ecuación:

$$\text{DRP} = [(1.98 * \text{STP}) + 79]/1000$$

Donde:

DPR = concentración de los escurrimientos de P disuelto (mg/L), y
STP = análisis de P del suelo (mg/kg) determinado a partir de un mapa de retícula de P del suelo.

2.3.6.4 Factor (K) Erosionabilidad del suelo

La erosionabilidad del suelo (k) es un factor de medida del potencial del suelo a la erosión y es sobre todo una función de la textura del suelo y su composición. Este factor se ha determinado para cada tipo de suelo en México (que es uno de los factores utilizados en la ecuación EUPS). Una representación de la erosionabilidad inherente del suelo creado con este conjunto de datos, se muestra en la Figura 2.3.7. Dentro de MapShed, un valor “ponderado” del factor K se calcula para cada uso del suelo/tipo de cobertura (área fuente) en una cuenca hidrográfica.

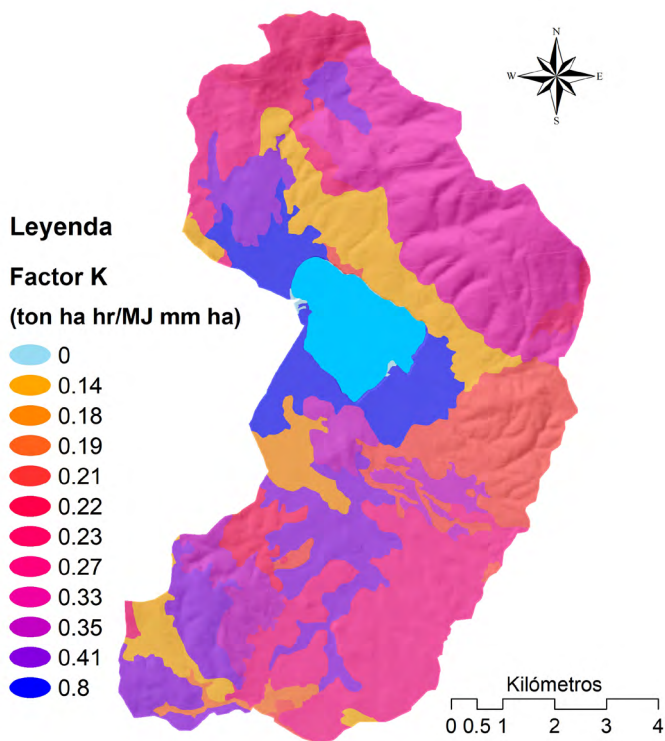


Figura 2.3.7. Mapa del Factor K, erosionabilidad del suelo de la EUPS, derivado del modelo MapShed (Modificada de IMTA 2013). Fuente: INEGI (2013) Continuo de Elevación Mexicano 3.0. INEGI (1980) Carta edafológica escala 1:50,000. Cortés (1991) Erosión Hídrica. IMTA (2013) Calculo del Factor K de la EUPS.

2.3.6.5 Factor (LS) Longitud y Pendiente

Este es una función del escurrimiento superficial y la pendiente (Stewart et al. 1975). La pendiente del terreno se estima utilizando una capa de elevación digital y la longitud de la pendiente (L). El valor se calcula mediante la ecuación:

$$L = 0.5 (A) / TSL$$

Dónde:

A = área de la cuenca, y

TSL = longitud total del cauce de la cuenca

Dentro de MapShed, la longitud de flujo se calcula utilizando una capa de cauce digital. El área de la cuenca se calcula directamente de la información de atributos de los polígonos proporcionada por el usuario “límite de la cuenca” del archivo (Figura 2.3.8). Con este enfoque se calcula un valor de LS para cada área de fuente mediante la ecuación:

$$LS = (L / 22.13) m * (0.065 + 0.045 S + 0.0065 S^2)$$

Dónde:

LS = factor de longitud y pendiente para el área de origen

L = longitud de la pendiente media de la cuenca

m = una constante que varía con la pendiente

S = la pendiente media (%) para el área de origen

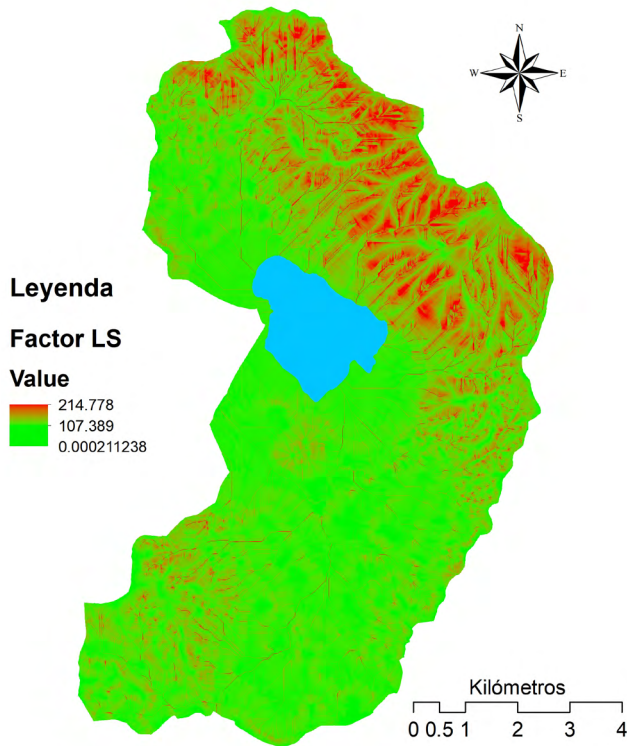


Figura 2.3.8. Mapa de los Factores (LS) Longitud y Pendiente del terreno de la EUPS, del modelo MapShed (Modificada de IMTA 2013). Fuente: INEGI (2013) Continuo de Elevación Mexicano 3.0 para obtener la longitud y pendientes del terreno en porcentaje. IMTA (2013) Cálculo de Factores LS de la EUPS.

2.3.7 Información requerida para la base de datos de nutrientes del modelo Mapshed

2.3.7.1 Concentraciones de nutrientes disueltos en el escurrimiento

2.3.7.1.1 Concentraciones de nutrientes en el escurrimiento de áreas de abono

El MapShed permite estimar la concentración de nutrientes disueltos en el escurrimiento de zonas agrícolas donde se aplica abono. Los valores predeterminados para nitrógeno y fósforo se pueden ajustar al alza en función de la densidad de animales de granja dentro de la cuenca determinada. En este caso, la densidad de animales se expresa en unidades equivalentes de animales (AEUs), por cada 1000 libras de animal.

La descripción anterior es útil si no se aplica el formulario de datos para especificar los tipos de animales de granja y las poblaciones nuevas. Si se usa esta forma de entrada de datos, entonces la mayor “zona de abono” descrita se pasa por alto y las cargas de animales se estiman rutinariamente.

2.3.7.1.2 Tasas de acumulación de nutrientes en zonas urbanas

MapShed utiliza los conceptos de “acumulación” y “lavado” para estimar las cargas de nutrientes de las zonas urbanas. Se supone que los nutrientes se acumulan en las superficies urbanas en el tiempo acorde con diversos insumos (deposición atmosférica, desperdicios de animales, basura de la calle, etc.) y posteriormente son lavados por lluvias periódicas. Los valores por defecto para diferentes categorías urbanas se basan en los sugeridos en MapShed.

2.3.7.1.3 Descargas de fuentes puntuales

En MapShed, el usuario especifica las cargas de fuentes puntuales y simplemente se añaden a las cargas de fuentes no puntuales calculada por el modelo. Donde es difícil recopilar información de la fuente puntual de descarga, MapShed facilita la tarea a través del uso de una “fuente puntual” de la capa que contiene información sobre la estimación de las cargas mensuales de nitrógeno y fósforo de las principales plantas de tratamiento de aguas residuales industriales y municipales. En Tuxpan, esta información se obtuvo de la base de datos manejada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA 2012) referente a las cargas anuales de las instalaciones permitidas (Evans y Corradini 2012).

Es posible mejorar la cuantificación para cualquier descarga puntual especificando la variación del flujo de los efluentes y las concentraciones de nutrientes mensualmente (Cuadro 2.3.6 y Figura 2.3.9). En MapShed, el flujo especificado por el usuario y la información de la concentración se utiliza para calcular las cargas mensuales en kilogramos de nitrógeno y fósforo totales. Además, el cálculo del balance mensual de agua considera los volúmenes de descarga.

Cuadro 2.3.6. Cargas puntuales de nutrientes de las localidades en la microcuenca.

Estado	Municipio	Localidad	Población total	Caudal Q (L/s)	Caudal Qd (L/s)	Carga N kg/día	Carga P kg/día
Guerrero	Iguala	Cereso	700	2.03	1.42	3.68	0.98
		Colonia El Tomatal (Kilómetro 128)	16	0.05	0.03	0.08	0.02
		Colonia Rancho Del Cura (El Cura)	699	2.02	1.42	3.67	0.98
		Colonia Renacimiento	250	0.72	0.51	1.31	0.35
		El Mancebo	18	0.05	0.04	0.09	0.03
		Filadelfia	7	0.02	0.01	0.04	0.01

Estado	Municipio	Localidad	Población total	Caudal Q (L/s)	Caudal Qd (L/s)	Carga N kg/día	Carga P kg/día
Guerrero	Iguala	Jalapilla (Rancho Tovar)	2	0.01	0.00	0.01	0.00
		La Mesa	2	0.01	0.00	0.01	0.00
		La Palma [Restaurante]	2	0.01	0.00	0.01	0.00
		Las Granjas	37	0.11	0.07	0.19	0.05
		Lindavista	8	0.02	0.02	0.04	0.01
		Platanillo	299	0.87	0.61	1.57	0.42
		Puente González Uno (Colonia Los Manantiales)	10	0.03	0.02	0.05	0.01
		Puerto Del Aire	18	0.05	0.04	0.09	0.03
		Ranchito Hermanos Ayala Bandera	5	0.01	0.01	0.03	0.01
		Tepantlán	50	0.14	0.10	0.26	0.07
		Tepochica	740	2.14	1.50	3.89	1.04
		Tonalapita Del Norte (Puente González)	32	0.09	0.06	0.17	0.04
		Tuxpan	2530	7.32	5.12	13.28	3.54
		Nacim Kuri Cristino	200	0.58	0.41	1.05	0.28
		Los Pajaritos	800	2.31	1.62	4.20	1.12
		Las Margaritas	400	1.16	0.81	2.10	0.56
		Villas del Rey	40	0.12	0.08	0.21	0.06
		La Floresta	200	0.58	0.41	1.05	0.28
		Electricistas	400	1.16	0.81	2.10	0.56
		Valle Dorado	209	0.60	0.42	1.10	0.29
Abrazo de Acatempan	2400	6.94	4.86	12.60	3.36		

Estado	Municipio	Localidad	Población total	Caudal Q (L/s)	Caudal Qd (L/s)	Carga N kg/día	Carga P kg/día
Guerrero	Iguala	René Juárez Cisneros	320	0.93	0.65	1.68	0.45
		Morelos	800	2.31	1.62	4.20	1.12
		Burócrata	25	0.07	0.05	0.13	0.04
		Los Amores	500	1.45	1.01	2.63	0.70
		San Juan	300	0.87	0.61	1.58	0.42
		La Palma	471	1.36	0.95	2.47	0.66
		El Tomatal	1245	3.60	2.52	6.54	1.74
		De La Guadalupe	25	0.07	0.05	0.13	0.04
		Central Campesina de Guerrero	57	0.16	0.12	0.30	0.08
		Tonalapa del Norte	80	0.23	0.16	0.42	0.11
		Totales	13,897	40	28.15	73	19.46

Fuente: Modificada de IMTA 2013



Figura 2.3.9. Cargas puntuales de nutrientes de localidades en microcuencas (Modificada de IMTA 2013). Fuente: INEGI (2013) Continuo de Elevación Mexicano 3.0; Fuente: INEGI (2012) Censo de población y Vivienda 2010. IMTA (2013) Encuesta de población).

2.3.8 Información requerida para la base de datos de clima del modelo Mapshed

Esta información la componen los valores de temperatura y precipitación diaria que se obtienen de las estaciones meteorológicas disponibles en la zona de estudio. El MapShed original supone “El año del tiempo”, de abril a marzo, similar al “año hidrológico” utilizado por el Servicio Meteorológico, de octubre 1 a septiembre 30, y supone que el sedimento acumulado el año anterior es “lavado” por los escurrimientos al comienzo de las primeras lluvias de cada año (Haith et al. 1992).

En MapShed los datos diarios provenientes de las estaciones meteorológicas cercanas se ordenan automáticamente. En Tuxpan se ordenaron los datos diarios de siete estaciones meteorológicas desde el año 1981 hasta el año 2010 (Cuadro 2.3.7 y Figura 2.3.10). Si una o más estaciones se encuentran dentro del polígono de la cuenca, se utilizan los valores medios diarios de temperatura y precipitación. Si no hay estaciones dentro del polígono de la cuenca, se utilizan los valores diarios de otras estaciones más cercanas al centro del polígono de las cuencas.

Cuadro 2.3.7. Estaciones climatológicas en las subcuencas de la Laguna de Tuxpan y Río El Tomatal

No. Estación	Nombre	Municipio	Año inicial	Año final
12004	Ahuehuepan	Iguala de La Independencia	1960	2010
12014	Buenavista de Cuéllar	Buenavista de Cuéllar	1927	2010
12093	Presa Valerio Trujano	Tepecoacuilco de Trujano	1956	2010
12115	Huitzucu (DGE)	Huitzucu de Los Figueroa	1964	2010
12116	Iguala (DGE)	Iguala de La Independencia	1953	2010
12164	E.T.A. 274 Cocula	Cocula	1975	2010
12222	Laguna de Tuxpan	Iguala de La Independencia	1981	2010

Fuente: CONAGUA (2012) Servicio Meteorológico Nacional.

Leyenda

Estaciones climatológicas



VALUE



12004
Ahuehuepan
1960-2010

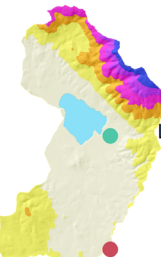
12116
Iguala (DGE)
1953-2010

12164
E.T.A. 274 Cocula
1975-2010

12014
Buenavista de Cuellar
1927-2010

12222
Laguna de Tuxpan
1981-2010

12115
Huitzuco (DGE)
1964-2010



12093
Presa Valerio Trujano
1956-2010

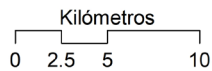


Figura 2.3. 10. Mapa de la distribución de las estaciones climatológicas (Modificada de IMTA 2013).

Fuente: INEGI (2013) Continuo de Elevación Mexicano 3.0. CONAGUA (2012) Base de datos CLICOM Servicio Meteorológico Nacional.

2.4 RESULTADOS

Se realizaron corridas de 1981 a 2010 con registros diarios del clima. La Figura 2.4.1 muestra los resultados obtenidos (promedios mensuales), señalando los procesos de precipitación, evapotranspiración y transporte por escurrimiento, flujo superficial y subterráneo.

Los promedios anuales de erosión y cargas totales de sedimentos fueron 74,650 t y 14,889 t, mientras que promedios mensuales se muestran en la Figura 2.4.2.

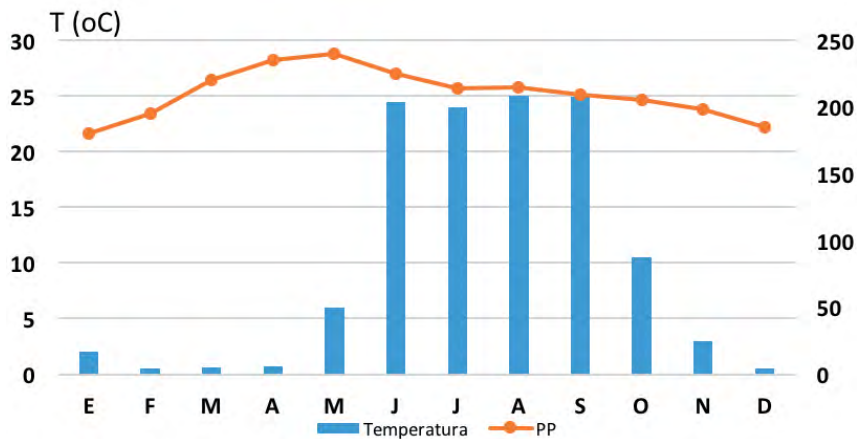


Figura 2.4.1. Promedios mensuales de balance hídrico (Modificada de IMTA 2013).

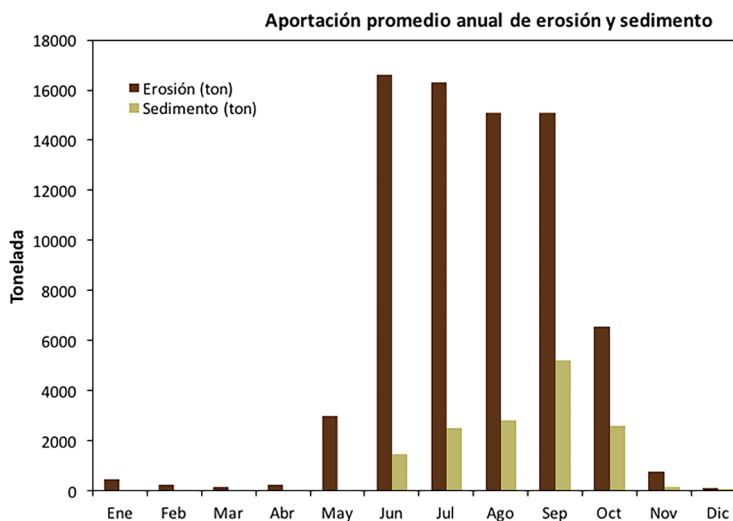


Figura 2.4.2. Promedio mensual de las cargas de erosión y sedimento (Modificada de IMTA 2013).

El lago recibe anualmente 107 Kg de nitrógeno (N) y 15 Kg de fósforo (P) en promedio, para el período simulado, incluyendo fuentes puntuales y difusas, asociadas al escurrimiento. En estiaje (noviembre a mayo), el valor mínimo estimado de N fue de 5.50 Kg, y en lluvias (junio a octubre) de 101.5 Kg. Las cargas respectivas de P total fueron de 1.4 Kg y 13.39 Kg (Figura 2.4.3).

El aporte porcentual de N total por fuentes puntuales fue de 22.93%, y por fuentes difusas 77.07% (Figura 2.4.4). En cuanto al P total, el aporte por fuentes puntuales fue de 15.99% y difusas de 87.04% (Figura 2.4.5).

El lago también recibe cargas anuales de patógenos, que tiene las entradas más altas durante los meses de junio y septiembre (Figura 2.4.6').

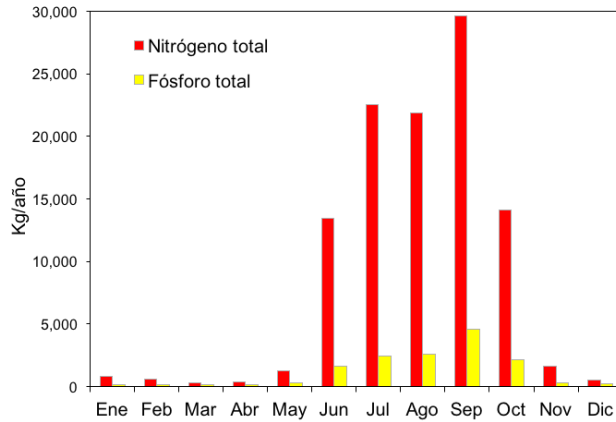


Figura 2.4.3. Promedios mensual de cargas de Nitrógeno y Fósforo (Modificada de IMTA 2013).

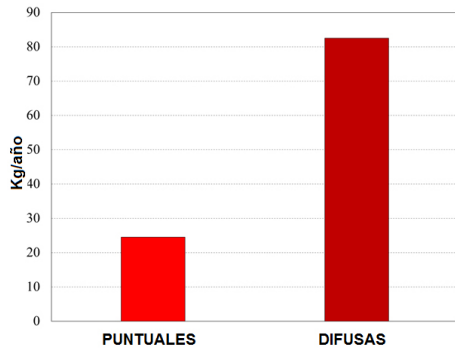


Figura 2.4.4. Fuentes por Nitrógeno (Modificada de IMTA 2013).

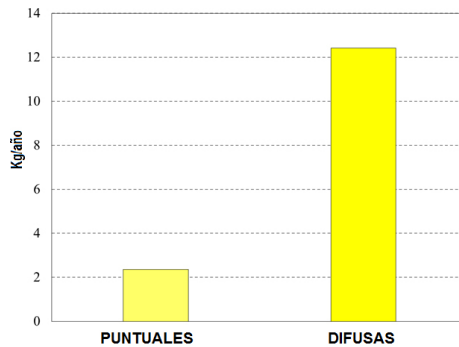


Figura 2.4.5. Fuentes por Fósforo (Modificada de IMTA 2013).

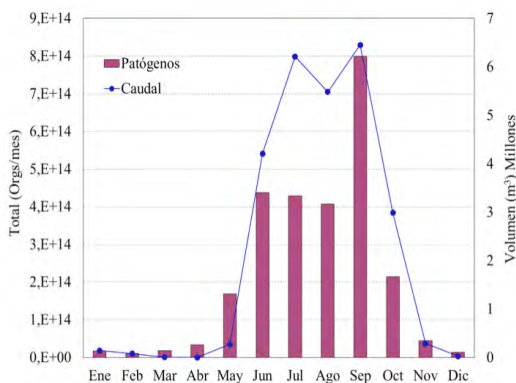


Figura 2.4.6. Promedio anual de cargas de Patógenos (Modificada de IMTA 2013).

Los rendimientos anuales de la erosión y los sedimentos por microcuenca se presentan en la Figura 2.4.7. En los arroyos se realizó el monitoreo de nutrientes (N y P en el agua), y se estimó la contribución de cada microcuenca (Cuadro 2.4.1 y Figura 2.4.8). Las áreas urbana, suburbana y rural contribuyen anualmente con 17.45 Kg de N y 1.78 Kg de P al lago de Tuxpan.

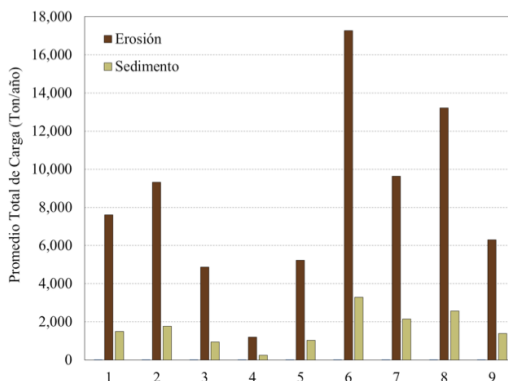


Figura 2.4.7. Rendimiento por microcuenca de erosión y sedimento (Modificada de IMTA 2013).

Cuadro 2.4.1. Cargas puntuales y difusas por microcuenca.

No	Microcuencas	Superficie (Km ²)	%	Cargas puntuales		Cargas puntuales	
				NT	NP	NT	NP
1	Platanillo	5.41	7.87	3.33	0.27	8.3	1.37
2	La Mesa	8.63	12.57	4.15	0.11	4.05	1.16
3	San Andrés	3.96	5.77	0.26	0.02	3.45	0.67
4	El Muelle	4.29	6.25	0.54	0.02	0.59	0.13
5	Tuxpan	6.73	9.8	2.42	0.27	2.366	0.61
6	Tepantlán	10.86	15.81	3.79	0.31	20.13	2.85
7	Tomatal	14.04	20.45	1.04	0.36	21.13	1.92
8	Tepochica	4.46	6.49	8.94	0.98	6.88	2.09
9	Acatempan	6.65	9.68	0.07	0.01	15.6	1.61
Lago de Tuxpan		3.65	5.31				
Total		68.68	100	24.54	2.36	82.47	12.42

Fuente: Modificada de IMTA 2013

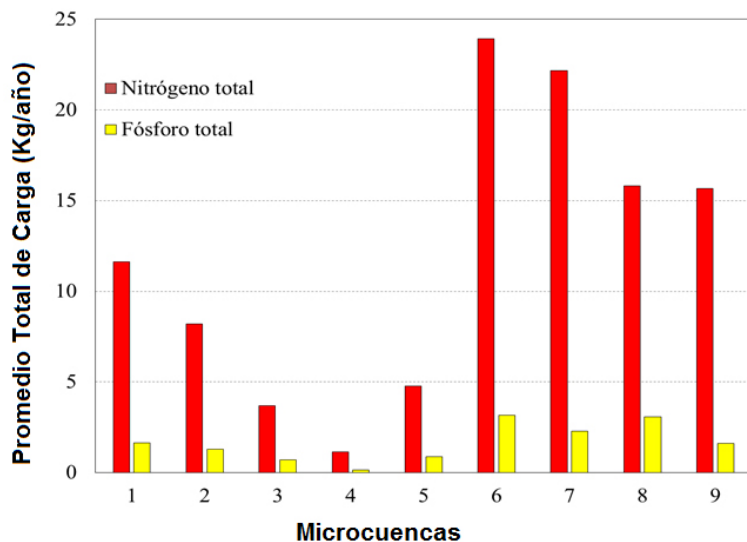


Figura 2.4.8. Carga anual de nutrientes por microcuencas (Modificada de IMTA 2013).

Los usos del suelo y las áreas con vegetación en ambas subcuencas se muestran en la Figura 2.4.9. Los resultados indican que la agricultura ocupa el 20.25% de la superficie total, el bosque natural y alterado abarca el 56.50%, y las zonas urbanas, suburbanas y rurales suman 8.88%.

El aporte de N de fuentes puntuales procedentes de las áreas urbana, suburbana y rural en las subcuencas, es de 18.31%. Los sistemas sépticos urbanos aportan 6.63%, y las superficies agrícolas 31.44% (Cuadro 2.4.2 y Figura 2.4.10). Las fuentes puntuales y los suelos agrícolas son los principales contribuyentes de la carga de P (Figura 2.4.11.).

El Cuadro 2.4.3. muestra la clasificación de los suelos de las nueve microcuencas en función de los aportes de sedimentos y nutrientes acorde con el uso predominante. Esta clasificación ayuda a identificar las microcuencas similares y a diseñar, implementar y evaluar las mejores prácticas de conservación por su eficacia a largo plazo.

Cuadro 2.4.2. Promedio de cargas por fuentes de Nitrógeno total y Fósforo total

Fuente	Nitrógeno Total (Kg)	Fósforo Total (Kg)
Agricultura	33.64	10.18
Bosque	1.8	0.37
Humedal	0.22	0.07
Perturbado	0.16	0.05
Terracería	1.4	0.06
Urbano	4	1.2
Suburbano	3.69	0.08
Rural	9.77	0.5
Animales	4.75	0.44
Banco de Corrientes	17.11	0.21
Agua subterránea	26.39	1.04
Fosas Sépticas	7.09	0.58
Total	107.01	14.79

Fuente: Modificada de IMTA 2013

Leyenda

Vegetación y uso del suelo

- Agricultura
- Banco de materiales
- Bosque de encino
- Bosque de galería
- Cauces
- Cuerpo de agua
- Cárcavas
- Frutales
- Hidrófitas
- Infraestructura
- Matorral
- Selva baja caducifolia
- Suelo desnudo
- Urbano

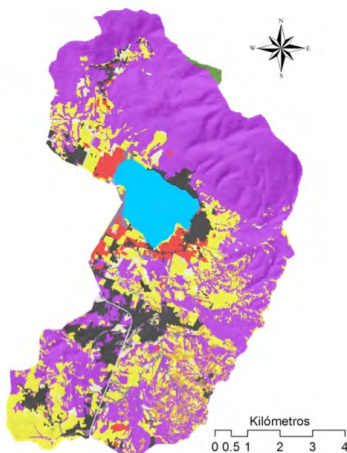


Figura 2.4.9. Patrón de uso del suelo en las microcuencas del lago de Tuxpan y río Tomatal (Modificada de IMTA 2013).

Los resultados promedio indican que las cuencas de Tuxpan y El Tomatal aportan al lago 107.012 Kg anuales de N y 14.786 Kg de P. La subcuenca de la Laguna de Tuxpan (con las microcuencas Platanillo, La Mesa, San Andrés, El Muelle, Tuxpan y Tepantlán) genera el 49.86% de N (53,353 Kg/año) y el 52.78% de P (7,804 Kg/año). El lago recibe el 71.59% (80.716 Kg/año) de N de fuentes difusas, y el 27.50% (24.540 Kg/año) de fuentes puntuales; y de P el lago recibe el 81.01% (11.979 Kg/año) de fuentes difusas y el 15.99% (2.364 Kg/año) de fuentes puntuales.

La subcuenca del río (con las microcuencas Tomatal, Tepochica y Acatempan), genera el 50.14% de N total (53.658 Kg/año) y 47.22% de P total (6.981 Kg/año). Respecto a la carga de N, 43.616 Kg/año son difusas, y 10.041 Kg/año son puntuales. De forma similar para el P, únicamente 5.627 Kg/año son de origen no puntual, y 1.353 Kg/año son puntuales.

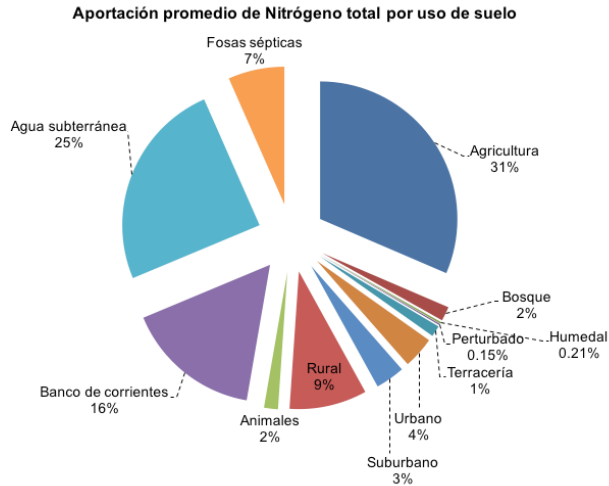
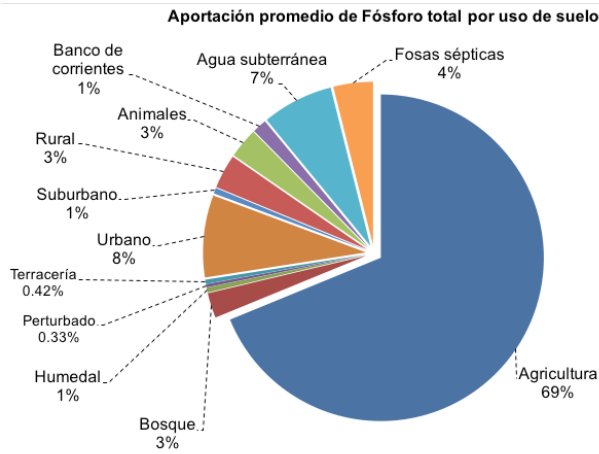


Figura 2.4.10. Contribución de Nitrógeno total por uso del suelo de fuentes puntuales (Modificada de IMTA 2013).



fuentes no puntuales (Modificada de IMTA 2013).

Cuadro 2.4.3. Contribución de Fósforo total por uso del suelo de fuentes no puntuales

Uso de Suelo	Porcentajes		
	1 - 25 %	26 - 60 %	> 60%
Urbano	1,2,3,4,5,6,7,8	9	
Agricultura	1,2,3,4,5,6,7,9	6,8	
Bosque	8	1,6,7,9	2,3,4,5,

Fuente: Modificada de IMTA 2013

La microcuenca del Tomatal generó la mayor contaminación difusa, con 21.128 Kg/año de N y 1.923 Kg/año de P, seguida por la microcuenca de Tepantlán con 20.134 Kg/año de N, y 2.847 Kg/año de P. Por contaminación puntual, la microcuenca Tepochica generó 8.935 Kg/año de N y 0.981 Kg/año de P; y la microcuenca Platanillo generó 3.331 Kg/año de N y 0.273 Kg/año de P.

Respecto a la contaminación puntual en las microcuencas densamente pobladas, los resultados fueron pobres. Acatempan con 0.70 Kg/año de N y 0.10 Kg/año de P; La Mesa, El Muelle y Tuxpan con la zona de restaurantes, huertas de mango y otras actividades antropogénicas, resultaron similares en sus porcentajes de N puntual y difusas. La Mesa, 4.148 Kg/año de contaminación puntual y 4.047 Kg/año de contaminación difusa; Tuxpan, 2.421 Kg/año de puntual y 2.356 Kg/año de difusa, y El muelle con 0.542 Kg/año de puntual y 0.592 Kg/año de difusa.

Las microcuencas con contaminación por P alta fueron: Tepantlán con 2.847 Kg/año de P por contaminación difusa y 310 Kg/año por contaminación puntual; Tepochica con 2.093 Kg/año de puntual y 0.981 Kg/año de difusa, el Tomatal con 1.923 Kg/año de difusa y 0.361 Kg/año de puntal, y La Mesa con 1.163 Kg/año de difusa y 0.110 Kg/año de puntual.

2.5 DISCUSIÓN

La aplicación de la interface MapShed, como apoyo para estimar el aporte de nutrientes en las cuencas pertenecientes a la Laguna de Tuxpan y río El Tomatal, junto con la información requerida recopilada, analizada y procesada en espacio-tiempo, permitió obtener las siguientes conclusiones:

La cuenca del río Tomatal, situada al sur de la zona estudiada, aporta la mayor carga de nutrientes de origen difuso, debido a que, en ésta se concentra la mayor población y la mayor actividad agro-pecuaria, mientras que la cuenca del lago de Tuxpan, situada en el centro norte de la zona estudiada, es la mayor aportadora de fuentes puntuales, debido a que aquí se concentra la mayor extensión del bosque tropical y pastizales, una parte de la población y una porción agropecuaria.

Respecto al N total, la cuenca del río Tomatal genera 53.658 Kg/año (50.14%) y la cuenca de la Laguna de Tuxpan 53.353 Kg/año (49.86%). Los aportes de las fuentes suman 107.012 Kg/año, de las cuales 24.540 Kg/año son puntuales (22.93%), y 82.471 Kg/año son difusas (77.07%). Respecto al P, las cuencas aportan 14.786 Kg/año, de las cuales 2.364 Kg/año son de origen puntual (15.99%) y 12.421 Kg/año por fuentes difusas (84,01%).

Como contaminación difusa, la cuenca del río Tomatal genera 43.616 Kg/año de N y 5.627 Kg/año de P. La microcuenca de la Laguna de Tuxpan genera 38.854 Kg/año de N y 6.793 Kg/año de P. Como contaminación puntual, la cuenca del río Tomatal genera 10.041 Kg/año de N y 1.353 Kg/año de P. La microcuenca de la Laguna de Tuxpan genera 14.498 Kg/año de N y 1.011 Kg/año de P.

De la subcuenca de la Laguna de Tuxpan, la microcuenca Tepantlán es la que aporta más nutrientes al lago: 3.791 Kg/año de N y 310 Kg/año de P, y 20.134 Kg/año de N y 2.847 Kg/año de P por fuentes difusas. De la subcuenca del río Tomatal, la microcuenca Tomatal es la que aporta más nutrientes al lago: 1.036

Kg/año de N y 0.361 Kg/año de P por fuentes puntuales, y 21.128 Kg/año de N y 1.923 Kg/año de P por fuentes difusas.

Con un aporte moderado de N, la microcuenca de Tepochica con 8.935 Kg/año por fuentes puntuales, y 6.883 Kg/año difusas, y de P el aporte es de 0.981 Kg/año puntuales y 2.093 Kg/año difusas.

Con el menor aporte de nutrientes al lago, la microcuenca de Acatempan con 0.70 y 0.10 Kg/año de N y P por fuentes puntuales, y 15.674 y 1.611 Kg/año difusas, respectivamente.

En las dos cuencas, la aportación de nutrientes es predominantemente por fuentes difusas. Respecto al N, el 31.44% lo aporta la agricultura, el 24.66% las aguas subterráneas, el 15.99% por los bancos de escurrimientos, el 9.13% por actividad pecuaria, el 6.63% por sistemas sépticos, y el 22.93% por fuentes puntuales. Respecto al P, el 71.81% lo aporta la actividad agro-pecuaria, el 3.93% los sistemas sépticos, el 7.05% por aguas subterráneas, y el 15.99% por fuentes puntuales.

Los resultados reportados en la literatura presentan una gran variabilidad en torno a los porcentajes de retención de nutrientes en lagos, dadas sus diferentes dimensiones y las características geomorfológicas de sus cuencas, por lo que resulta problemático estimar un valor de retención de nutrientes para la Laguna de Tuxpan. Sin embargo, es posible afirmar que el lago ejerce un papel importante no solo en la retención de sedimento, sino también en la retención de nutrientes, ya que la mayor parte de los nutrientes que llegan provienen de ambas cuencas del sistema (aproximadamente el 80.01% del N y 11.99% del P), lo que genera problemas de eutroficación en la Laguna de Tuxpan.

2.6 REFERENCIAS

- AVILÉS, A. Y NIELL, F. 2007. The Control of a Small Dam in Nutrient Inputs to a Hypertrophic Estuary in a Mediterranean Climate. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 180, n. 1-4, p. 97-108, March.
- CAMPBELL, N.S., D'ARCY, B.J., FROST, C.A., NOVOTNY, V. Y A.L. SANSOM, 2006. *Diffuse Pollution. An introduction to the problems and solutions*. IWA Publishing. UK.
- CARACO, N. F. Y COLE, J.J. 1999. Human Impact on nitrate export: An analysis using major world rivers. *Amibo* 28: 167-170.
- DELIMAN, P.N., R.H. GLICK, Y C.E. RUIZ, 1999. *Review of Watershed Water Quality Models*. U.S. Army Corps of Engineers, Tech. Rep. W-99-1, 26 pp.
- EVANS, B.M., R.A. WHITE, G.W. PETERSEN, J.M. HAMLETT, G.M. BAUMER Y A.J. MC-DONNELL, 1994. *Land Use and Non-point Pollution Study of the Delaware River Basin*. Environmental Resources Research Institute, Penn State University, Pub. NO. ER94-06, 76 pp.
- EVANS, B.M., D.W. LEHNING, K.J. CORRADINI, G.W. PETERSEN, E. NIZEYIMANA, J.M. HAMLETT, P.D. ROBILLARD, Y R.L. DAY, 2002. A comprehensive GIS-based modelling approach for predicting nutrient loads in watersheds. *J. Spatial Hydrology* 2(2).
- EVANS, B.M. Y K.J. CORRADINI. 2009. AVGWLF, Version 7.2.3: *A Guide to Creating Software-Compatible Data Sets*. Penn State Institutes of the Environment, 34 pp.
- EVANS, B.M. Y CORRADINI, K.J. 2012. *MapShed, Version 1.0. User guide*. Penn State Institute of Energy and the Environment. Pennsylvania State University. University Park, PA 16802.134 pp.
- FIGUEROA, S. B., AMANTE, O. A., CORTÉS, T. H., PIMENTEL, L.J., OSUNA, C. E. RODRÍGUEZ, O. J. Y MORALES, F. F. 1991. *Manual de Predicción de pérdida de suelo por erosión*. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- GÓMEZ, M. A., MIJANGOS, M. A., IZURIETA, J. L. Y SALDAÑA, M. P. 2007. Estimation of diffuse pollution in central watershed of Mexico. Proceedings of IWA 11th International Conference on Diffuse Pollution and First Joint Meeting of the IWA Diffuse Pollution and Urban Drainage Specialist Groups, *Belo Horizonte*, Aug. 26 – 31 2007: 1 7.
- HAITH, D.A. Y L.L. SHOEMAKER. 1987. Generalized Watershed Loading Functions for Stream Flow Nutrients. *Water Resources Bulletin*, 23(3), pp. 471-478.
- HAITH, D.R., R. MANDEL, Y R.S. WU, 1992. *GWLF: Generalized Watershed Loading Functions User's Manual, Vers. 2.0*. Cornell University, Ithaca, NY.
- HUMBORG, C., ITTEKOT, V., COCIASU, A. Y BODUNGEN, B. V. (1997) Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, p. 386: 385-388

- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. 2000. *Evaluación de la contaminación difusa en la cuenca del río Apatlaco*. Reporte Final del Proyecto.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. 2001. *Aplicación y capacitación de la metodología sobre contaminación difusa en una subcuenca del río Lerma*. CNA-IMTA. Reporte Final del Proyecto.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. 2003. *Estimación del impacto de las descargas del dren Zurumútaro en el Lago de Pátzcuaro y alternativas de tratamiento*. Reporte Final del Proyecto.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. 2005. *Secretaría de Medio Ambiente*. Reporte Final.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. 2007a. *Programa para el control en la cuenca baja del río Lema*. Reporte Final.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. 2007b. *Monitoreo periódico de la calidad del agua del lago de Pátzcuaro y de las descargas*. Informe Final.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. 2013. *Estudio para la Identificación de las Causas Niveles y Grado de Contaminación Ambiental en la Laguna de Tuxpan, Guerrero y Propuestas para el Tratamiento de las Aguas Residuales Descargadas en Ella y sus Afluentes*. Informe Final. Tomo I. Convenio CCE.01.04.3.2013.-0231.
- IZURIETA, J. L., HUERTO R. I. Y MIJANGOS, M. A. 2005. Aportaciones de nutrientes al Lago de Cuitzeo provenientes de la Ciudad de Morelia y cuenca propia. Capítulo 16. 30 pp. En: Gutiérrez-López A., Ramírez-Orozco A.I. Sánchez-Ramos F. (Editores). *Las ciencias del agua en Morelia, aplicaciones frente a los retos del siglo XXI*. Ediciones IMTA-UMSNH, Jiutepec / Morelia, Michoacán, México, 298 pp.
- IZURIETA, J. L., HUERTO R. I. Y MIJANGOS, M. A. 2007. Input by Point and non point sources in the watershed of lake Cuitzeo, Mexico. Proceedings of IWA 11th International Conference on Diffuse Pollution and First Joint Meeting of the IWA Diffuse Pollution and Urban Drainage Specialist Groups, *Belo Horizonte*, Aug. 26 – 31 2007: 1 7.
- JOHNSON, G. V. Y BARTON, L. L. 1985. *Role of Nitrogen, Phosphorus and Iron in Occurrence of Algal Blooms at Abiquiu and Cochiti Reservoirs*. Available from National Technical Information Service, Springfield VA 22161, as PB86-237088. Price codes: A08 in paper copy, A01 in microfiche. New Mexico Water Resources Research Institute, Las Cruces, Technical Completion Report No. 185, April.
- MIJANGOS CARRO M., IZURIETA DÁVILA J., GÓMEZ BALANDRA A., HERNÁNDEZ LÓPEZ R., HUERTO DELGADILLO R., SÁNCHEZ CHÁVEZ J. Y BRAVO INCLÁN L. 2008. Importance of diffuse pollution control in the Patzcuaro Lake Basin in Mexico. *Water Science & Technology*. Vol 58 No 11 pp 2179–2186.

- MIJANGOS-CARRO, M.A., IZURIETA, J.L., HERNÁNDEZ, R.D., GÓMEZ, M.A., SALDAÑA, M.P., MEDINA R., WRUCK, K.W. Y RIVERA, P. 2009. Diffuse pollution control in the Turbio River Basin Mexico. Proceedings of IWA 13th International Conference on Integrated Diffuse Pollution Management (DIPCON2009). Lotte Hotel World, Seoul, Republic of Korea: 12-15 October 2009.
- MIJANGOS-CARRO, M.A., HERNÁNDEZ, R.D., GÓMEZ, M.A., IZURIETA J.L., SALDAÑA, M.P., MEDINA, R., WRUCK, K.W. Y RIVERA, P. 2010. Diffuse pollution control in the lower Lerma River Basin, Mexico. Proceedings of IWA 14th International Conference, IWA Diffuse Pollution Specialist Group: Diffuse Pollution and Eutrophication. DIPCON2010. September 12-17, 2010. Beupré, Quebec, Canada.
- NOVOTNY, V. 1999, Integrated Management of Water Quality: The Role of Agricultural Diffuse Pollution Sources. *Water Science and Technology*, Volume 39, Issue 3, Pages 1–13
- NOVOTNY, V. 2003. *Water Quality: diffuse pollution and watershed Management*. 2nd Edition. John Wiley & Sons. New York pp. 864.
- TEODORU, C., MCGINNIS, D. F., WUEST, A. Y WEHRLI, B. 2006. Nutrient Retention in the Danube's Iron Gate Reservoirs. *Eos, Transaction American Geophysical Union*, vol. 87, Is. 38, p. 385-392
- UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1977. Storage, Treatment, Overflow Runoff Model. User's Manual. *Hydrologic Engineering Center*. 184 p. August.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1999. *Protocols for developing nutrient TMDLs*. EPA 841-B-99-007. Office of Water (4503 F), Washington, D.C.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2008. *Handbook for Developing Watershed Plans to Restore and Protect Our Waters*. EPA 841-B-08-002. Office of Water Nonpoint Source Control Branch Washington, D.C.
- U.S. SOIL CONSERVATION SERVICE. 1986. *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release NO. 55 (2nd edition). U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.
- WIERZBICKI, M. Y ANTECKI, MACIEJ. 2003. *The Changes of Water Quality in Jeziorsko Reservoir and Warta River Against the Background of Hydrology Characteristic and Water Management in the Reservoir*. International Conference "Towards Natural Flood Reduction Strategies", Warsaw, p. 6-13, September.
- WHISCHMEIER, W.H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. *Soil. Sc. Soc. Am. Proc.* 23. 246-249.
- WHISCHMEIER, W.H., C.B. JOHNSON, Y B.V. CROSS. 1971. A soil erodability monograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Cons.* 26: 189-193.
- WHISCHMEIER, W.H. Y D.D. SMITH. 1978. *Predict rainfall erosion losses*. Agr. Handbook 537. U.S. Dept. Agr. Washington, D.C. 58 pp.



“Erosión y sedimentación de las subcuencas del río Tomatal y laguna de Tuxpan, Gro.”

EDITORES:

Pedro Rivera Ruíz.

Klaus Werner Wruck Spillecke.

CONTENIDO

Capítulo 3

3.1 INTRODUCCIÓN	92
3.2 ÁREA DE ESTUDIO	93
3.2.1 Características de las Subcuencas El Tomatal y Laguna de Tuxpan (Guerrero)	93
3.3 MÉTODOS	95
3.3.1. Erosión Hídrica	95
3.3.1. Factor R (Erosividad de la Lluvia)	96
3.3.2. Factor K (erosionabilidad del suelo)	97
3.3.3. Factor LS (Longitud e inclinación de la pendiente)	98
3.3.4. Factor CP (cobertura vegetal y prácticas de conservación de suelo y agua)	98
3.3.5. Erosión hídrica actual	102
3.3.6 Estimación de sedimentos	104
3.3.6.1. Esguerrimiento medio	104
3.3.6.2 Esguerrimiento máximo	105
3.3.6.3. Cuantificación de la producción de sedimentos	105
3.4 RESULTADOS	108
3.4.1. Situación actual y análisis de la utilización de agroquímicos en la subcuenca de la Laguna de Tuxpan, Gro.	110
3.4.2. Fertilizantes	112
3.4.3. Herbicidas	112
3.4.4 Insecticida – Plaguicidas	114
3.4.5. Fungicidas	115
3.4.6. Tratamiento para semillas	115
3.4.7. Adherentes	116
3.4.8. Sistema de Producción de Maíz	116
3.5 DISCUSIÓN	119
3.5.1. Propuesta de Manejo Conservacionista para las Subcuencas	119
3.5.2. Recomendación para disminuir la carga de plaguicidas	134
3.6 REFERENCIAS	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.2.1. Mapa topográfico con la subdivisión hidrológica de las subcuencas de El Tomatal y Laguna de Tuxpan, Gro. (modificada de IMTA 2013).	94
Figura 3.3.1. Mapa de uso del suelo y vegetación de las subcuencas de El Tomatal y Laguna de Tuxpan, Gro. (modificada de IMTA 2013).	99
Figura 3.3.2. Mapa de erosión hídrica actual de las subcuencas de la Laguna de Tuxpan y El Tomatal (modificada de IMTA 2013).	102
Figura 3.3.3. Microcuencas seleccionadas para el cálculo de sedimentos, en (t/ha).	107
Figura 3.4.1. “Zona inestable” y “Zona de agricultura de laderas”: detalle del uso de suelo 2013 (modificada de IMTA 2013).	118
Figura 3.5.1. Problema de la zona inestable por la formación de cárcavas (microsubsubcuencas AM SUR, BH, BF, BE Y BC)	121
Figura 3.5.2. Prácticas actuales de agricultura de ladera observadas (Fuente IMTA 2013).	123
Figura 3.5.3. Colocación de represas filtrantes con estacas retoñables	132

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 3.3.1. Uso de suelo y factor CP	100
Cuadro 3.3.2. Mapa de erosión hídrica actual de las subcuencas de la Laguna de Tuxpan y El Tomatal	103
Cuadro 3.4.1. Producción de agua y sedimentos en las microcuencas seleccionadas	108
Cuadro 3.4.2. Resultado de la estimación de la producción de sedimentos	109
Cuadro 3.4.3. Principales agroquímicos utilizados en la subcuenca de la Laguna de Tuxpan	110
Cuadro 3.5.1. Recomendaciones para la estabilización de cauces	131

3.1 INTRODUCCIÓN

En los proyectos de manejo de cuencas es imprescindible conocer el comportamiento del material sólido producido o generado en su suelo, mismo que será transportado por el sistema fluvial, el viento y la gravedad. También se requiere conocer el mecanismo que transporta este sedimento en la red de cauces para evaluar la erosión y la sedimentación actuales, especialmente donde el suelo presenta pendiente alta y vegetación escasa y la precipitación intensa potencia la erosión en la cuenca, elevando el transporte de sólidos y la sedimentación en la red de drenaje (Cantero et al. 2012).

Para conocer el comportamiento de la erosión en las subcuencas de “El Tomatal” y “Laguna de Tuxpan”, se identificaron las áreas erosionadas cuyos materiales removidos impactan las partes bajas, principalmente la sedimentación del lago en la entrada al afluente El Tomatal. Por lo tanto, los objetivos del presente trabajo consistieron en: a) Elaborar el estudio de erosión hídrica para identificar las áreas productoras de sedimentos de las subcuencas, b) Estimar el volumen de sedimentos transportados por sus afluentes principales, y c) Definir las estrategias de manejo y control de la erosión hídrica en laderas y cauces de las subcuencas.

3.2 ÁREA DE ESTUDIO

3.2.1 Características de las Subcuencas del El Tomatal y Laguna de Tuxpan (Guerrero)

La subcuenca del lago “Laguna de Tuxpan” tiene una superficie de 6,913.65 ha, en su mayoría ubicada en el municipio de Iguala, al norte del estado de Guerrero. Forma parte de la Región Hidrológica (RH 18) Río Balsas, subcuenca (18 B) - Río Balsas- Mezcala, subcuenca (18 Bh) - Río Cocula. La subcuenca del Río Cocula forma parte de la subcuenca del Río San Juan de Iguala. La subcuenca del lago se ubica al oriente de la Cd. de Iguala, colindando con su zona urbana. Una pequeña parte del extremo norte se ubica en el municipio de Buenavista de Cuellar y otra pequeña parte del extremo sureste en el municipio de Tepecoacuilco de Trujano.

El lago se ubica en el centro de la subcuenca y es alimentada por varios afluentes, de los cuales 13 descargan originalmente al lago, provenientes del N, E y SE (subcuenca A, Laguna de Tuxpan). Desde el Sur entra por un canal artificial el río El Tomatal, que a su vez descarga al Río Cocula por el Canal de Llamada, o salida del lago. La subcuenca B, “Río El Tomatal”, aporta la mayor parte de los azolves y contaminantes.

Los asentamientos humanos más numerosos son Tuxpan, Abrazo de Acatempan y Tomatal. Otras comunidades pequeñas son: Platanillo, Tonalapita, Colonia El Mirador, Tepantlán, José María Morelos y Pavón, Tepochica, y Rancho El Cura. La Figura 3.2.1 es el mapa topográfico con la subdivisión hidrológica en subcuencas y microcuencas.

La subcuenca de la Laguna de Tuxpan es la mayor superficie con 4,036.45 ha, el 58.38% del total, seguida de la subcuenca del río El Tomatal con 2,512.65 ha (36.34%). El lago ocupa una superficie de 364.56 ha (5.27%).

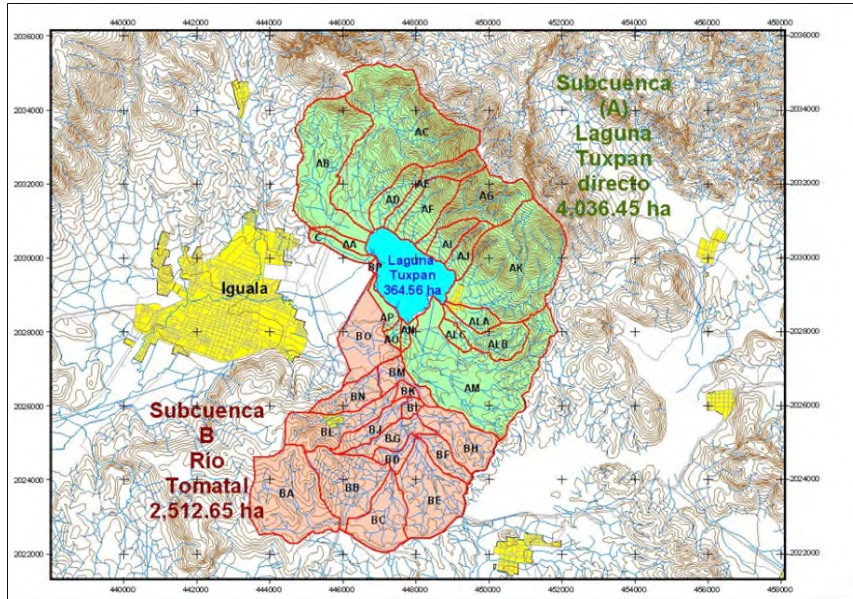


Figura 3.2.1. Mapa topográfico con la subdivisión hidrológica de las subcuencas de el Tomatal y Laguna de Tuxpan, Gro. (Modificada de IMTA 2013).

3.3. MÉTODOS

3.3.1 Erosión Hídrica

El desarrollo de cultivos en suelos con alta pendiente incrementa la erosión hídrica y complica la problemática en las partes bajas de la cuenca donde se depositan las partículas. Siendo un fenómeno físico que presiona a los recursos naturales al destruir los bosques, tiene implicaciones socioeconómicas. La erosión hídrica se evalúa mediante la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (EUPS) adaptada a las condiciones de México (Figueroa et al. 1991), que estima los valores de pérdida anual de suelo mediante la siguiente expresión:

$$A = R K L S C P \quad (1)$$

Dónde:

- R = Factor de erosividad de la lluvia: relación entre energía e intensidad de la precipitación máxima en un período de 30 minutos ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{hr}^{-1}$).
- K = Factor de erosionabilidad del suelo: adimensional que refleja la propensión del suelo a sufrir un cierto tipo de erosión. Depende de la textura y contenido de materia orgánica.
- L = Factor de longitud de la pendiente: adimensional, que refleja la longitud de la pendiente con relación a la pérdida de suelo en un campo experimental de longitud 22.13 m.
- S = Factor de pendiente: adimensional que refleja la inclinación de la pendiente con relación a la pérdida de suelo de una parcela experimental de pendiente 9%.

- C = Factor de cobertura vegetal; adimensional que refleja la relación con la pérdida de suelo de una parcela experimental cultivada en condiciones de barbecho desnudo.
- P = Factor de prácticas de conservación de agua y suelo: adimensional que refleja la relación con la pérdida de suelo de un campo sin prácticas de conservación.
- A = Tasa de erosión (t/ha).

3.3.1. Factor R (Erosividad de la Lluvia)

El potencial erosivo de la lluvia determina la erosión del suelo (Figuroa et al. 1991). La erosión se incrementa con la intensidad de la lluvia. Una lluvia suave y prolongada puede tener la misma energía total que una lluvia de corta duración y más intensa. Cuando la energía se combina con la intensidad de la lluvia (EI: energía/intensidad), el producto predice bien el potencial erosivo. EI, es el valor total de la tormenta por su intensidad máxima en 30 min, e indica cómo el desprendimiento de partículas se combina con la capacidad de transporte. La suma de los promedios anuales de EI para una localidad en particular, es el “Índice de Erosividad de la lluvia” R. Se estima utilizando valores de precipitación media anual en las áreas de influencia de las estaciones climatológicas ubicadas dentro de la subcuenca (Laguna de Tuxpan, 12-222; Tuxpan-Iguala, 12-159), y en el entorno de la subcuenca (Ahuehuepan-Iguala, 12-004; Valerio Trujano-Iguala, 12-093; Buenavista de Cuellar, 12-014; Iguala de la Independencia 12-216; Iguala-DGE, 12-116; Iguala-Iguala, 12-047; y Tepecoacuilco, 12-085).

Con los datos de precipitación se obtuvo el mapa del factor R de las subcuencas, que varió entre 4,120 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ (extremo SE) hasta 5,450 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ (extremo NE). El N-centro y SO con 5,000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ y el S (mayor parte de la subcuenca de El Tomatal) con 4,550 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹.

3.3.2. Factor K (erosionabilidad del suelo)

La erosionabilidad es la facilidad con la que se desprenden las partículas de suelo por el golpeteo de la lluvia y/o por el flujo superficial. Resulta del efecto combinado de la lluvia, el escurrimiento y la infiltración. Los suelos pueden ser menos erosionables si se reduce la fracción de limo, a pesar del correspondiente incremento en arcilla o arena. El factor K representa el cómo las propiedades del perfil del suelo afectan su pérdida. Los valores de K se asignan usando el nomograma de erodabilidad del suelo, que combina el efecto del tamaño de las partículas, la materia orgánica (%MO), el código de la estructura del suelo y la clase de permeabilidad del perfil. La susceptibilidad a erosionarse aumenta con el contenido de limo y disminuye con el de materia orgánica. Un suelo arcilloso, arenoso y con contenido alto de materia orgánica es más estable y tiende a erosionarse menos. El factor K se obtiene a través de diagramas donde interviene la textura y el contenido de materia orgánica (Figuroa et al. 1991, Mitsova 2001).

El factor K se calcula a través de las cartas edafológicas escala 1:50,000 de INEGI, digitalizando las unidades de suelo. Allí se identificaron 20 Unidades con mezclas de diferentes clases: Cambisol calcárico (Bk), Cambisol crómico (Bc), Castañozem calcárico (Kk), Castañozem háplico (Kh), Castañozem luvico (Kl), Feozem calcárico (Hc), Feozem háplico (Hh), Litosol (I), Luvisol calcárico (Lk), Luvisol crómico (Lc), Regosol calcarico (Rc), Rendzina (E), Vertisol cromico (Vc), Vertisol pélico (Vp); la gran mayoría con textura media, en especial los vertisoles con textura fina.

Se tomó una muestra de suelo por cada unidad para analizarlas en el Laboratorio Central Universitario de la Universidad Autónoma Chapingo, donde se determinaron las variables físico-químicas: granulometría (textura de Day modificado), densidad aparente, textura, curva de retención de humedad; pH, materia y nitrógeno orgánicos (mg/L); fósforo asimilable (mg/ L); potasio, calcio y magnesio intercambiables (mg/L); hierro, cobre, zinc y manganeso (mg/L); y conductividad hidráulica. Con los datos de laboratorio se calcularon los valores del factor K, asignándolos a cada unidad de suelo.

3.3.3. Factor LS (Longitud e inclinación de la pendiente)

Se utilizó la carta topográfica escala 1:50,000 de INEGI (2007), con equidistancias de 20m entre curvas de nivel, en formato vectorial con clave E14A78 para obtener el Modelo de Elevación Digital. Con esta información se generaron los archivos en formato Raster de inclinación de la pendiente y de dirección del flujo para aplicar los métodos Algebraicos de Zevenbergen y Thorne (1987) y el algoritmo de Tarboton (1997).

3.3.4. Factor CP (cobertura vegetal y prácticas de conservación de suelo y agua)

El factor C compara la pérdida de suelo respecto a una parcela experimental cultivada en condiciones prefijadas de barbecho desnudo. Disminuye al aumentar la cubierta vegetal y su densidad, y se asigna a cada categoría de uso de suelo mediante la relación: porcentaje de cobertura y suelo cubierto. Se obtiene por cálculo (sistemas agrícolas) y Cuadros (sistemas pecuarios y forestales) presentados en Figueroa et al. (1991). Requiere información precisa de vegetación y usos de suelo recientes verificados en campo. Para obtener el mapa del uso de suelo se utilizaron las imágenes de Google Earth de diciembre 27 de 2012, y la verificación de campo, para finalmente obtener el mapa de uso de suelo y vegetación actualizado y afinado (Figura 3.3.1).

Las prácticas en superficies muy reducidas se realizaron utilizando el inventario de prácticas conservacionistas mediante recorridos de campo previa identificación en Google Earth:

- Surcado a curva de nivel en áreas agrícolas (Aa-CN), factor $P = 0.8$;
- Tinas ciegas en pastizales y áreas forestales (Fp-z-CN, Fpp-z-CN), factor $P = 0.7$;
- Terrazas en algunas áreas agrícolas en descanso con pastizales y en áreas forestales alteradas (Fp-t-CN, Fpp-t-CN, AP-t-CN), factor $P = 0.7$;
- Barreras vivas arbóreas o arbustivas en curva de nivel en algunas áreas

agrícolas y en pastizales, además surcado al contorno en áreas agrícolas (AP-F-CN), (Aa-F-CN), factor P = 0.5.

Los factores C y P se multiplican obteniendo el factor CP (Cuadro 3.3.2). En total son 1,516.413 ha (21.93 %) de agropecuarios diversos; 201.97 ha (2.91%) de frutales; 4,034.385 ha (58.36 %) de suelos forestales de diversos niveles de degradación; 184.47 ha (2.67 %) de áreas completamente degradadas; 367.13 ha (5.31 %) de cuerpos de agua y humedales, y 609.20 ha (8.81 %) de zonas urbanas e infraestructura, estas últimas con tendencia a incrementarse debido a la cercanía y la expansión de la ciudad de Iguala. El hombre tiene mayor oportunidad de intervenir únicamente en los factores C y P para controlar la erosión (Pasolac 2005).

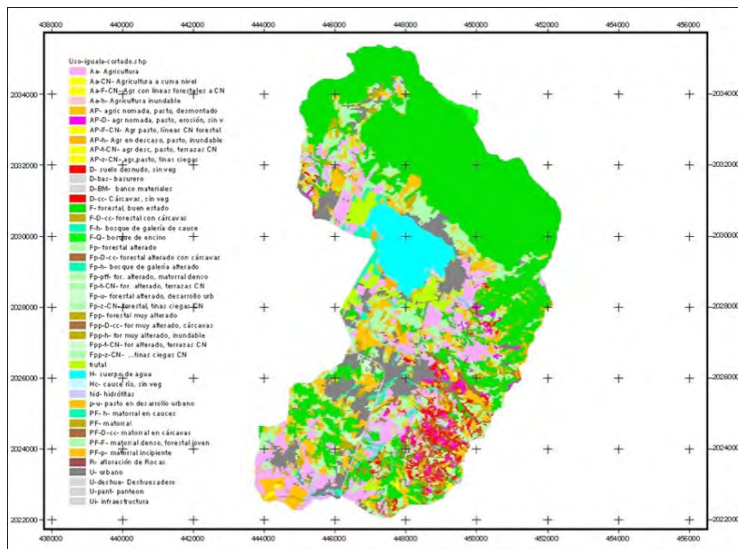


Figura 3.3.1. Mapa de uso del suelo y vegetación de las subcuencas de El Tomatal y Laguna de Tuxpan, Gro. (Modificada de IMTA 2013).

Cuadro 3.3.1. Uso de suelo y factor cp

Uso_Nombre	ha	%	Factor CP	ha	%
Aa- Agricultura, Aa-h- Agricultura inundable	711.949	10.30	0.4225	1516.413 ha Agro-pecuario	21.93 %
Aa-CN- Agricultura a curva nivel	2.538	0.04	0.3380		
Aa-F-CN- Agricultura con líneas forestales a curva de nivel	3.142	0.05	0.2366		
AP- Agricultura nómada, pasto, área desmontado	570.975	8.26	0.2216		
AP-D- agricultura nómada, pasto, erosión, casi sin vegetación	85.051	1.23	0.7500		
AP-F-CN- Agricultura pasto, líneas curva de nivel forestal	7.986	0.12	0.1241		
AP-h- Agricultura en descanso, pasto, inundable	19.115	0.28	0.2216		
AP-t-CN- agricultura nómada, pasto, terrazas curvas de nivel	2.092	0.03	0.2164		
AP-z-CN- agricultura nómada, pasto, tinas ciegas	1.234	0.02	0.2216		
p-u- pasto en desarrollo urbano	70.355	1.02	0.1500		
PF-D-cc- matorral en cárcavas	8.060	0.12	0.4628		
PF-p- matorral incipiente	33.916	0.49	0.1200		
frutal	201.967	2.92	0.0130	201.967	2.92
D- suelo desnudo, sin vegetación, D-cc- Cárcavas	180.804	2.62	1.0000	184.473 Ha degradada	2.67 %
D-bas- basurero	1.409	0.02	0.0000		
D-BM- banco materiales	2.260	0.03	1.0000		
F- forestal buen estado (SBC), F-h- bosque galería, FQ- bosque encino	2800.71	40.51	0.0001		

Uso_Nombre	ha	%	Factor CP	ha	%
F-D-cc- forestal con cárcavas (rehabilitación natural)	39.168	0.57	0.0250	4034.385 Ha forestal diverso	58.36 %
Fp- forestal alterado	687.223	9.94	0.0010		
Fp-D-cc- forestal alterado con cárcavas (rehabilitación natural)	91.354	1.32	0.0350		
Fp-h- bosque de galería alterado	34.189	0.49	0.0010		
Fp-pff- forestal alterado, matorral denso	68.604	0.99	0.0010		
Fp-t-CN- forestal alterado, terrazas a curva de nivel	1.552	0.02	0.0050		
Fp-u- forestal alterado, desarrollo urbano	18.705	0.27	0.0150		
Fp-z-CN- forestal, tinas ciegas a curva de nivel	0.940	0.01	0.0010		
Fpp- forestal muy alterado	126.284	1.83	0.0150		
Fpp-D-cc- forestal muy alterado, cárcavas	15.152	0.22	0.3800		
Fpp-h- forestal muy alterado, inundable	4.042	0.06	0.0150		
Fpp-t-CN- forestal muy alterado, terrazas curva de nivel	0.854	0.01	0.0090		
Fpp-z-CN- forestal muy alterado, tinas ciegas curvas de nivel	0.553	0.01	0.0050		
PF-F- matorral/ denso, forestal joven	23.951	0.35	0.0070		
PF- matorral, PF-h- matorral en cauces	121.104	1.75	0.0200		
H- cuerpo de agua, Hc- cauces de río, hid- zona de hídofitos	367.129	5.31	0.0000	367.129	5.31
R- afloración de Rocas	0.085	0.00	0.0000	0.085	0.00
U- urbano, áreas de deshuesaderas, panteones e infraestructura	609.201	8.81	0.0000	609.201	8.81
	6913.653	100.00	0.0000	6913.653	100.00

Nota: Uso con factor CP similar están multiplicados en la misma casilla; (Modificada de IMTA 2013).

3.3.5. Erosión hídrica actual

El cálculo de la erosión hídrica actual se determina al multiplicar el mapa de erosión potencial (que se obtiene de multiplicar los factores R, K, LS), con el mapa de cobertura vegetal (factor C) y el de prácticas conservacionistas (factor P) en formato Raster. Al final se agrupan las diferentes tasas de erosión para obtener su distribución en las subcuencas (Figura 3.3.2).

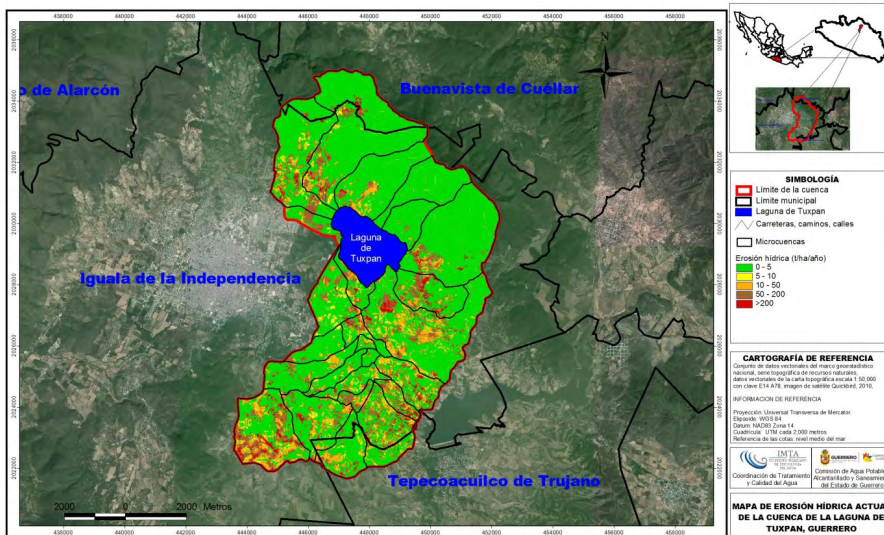


FIGURA 3.3.2. Mapa de erosión hídrica actual de las subcuencas de la Laguna de Tuxpan y El Tomatal (modificada de IMTA 2013).

El Cuadro 3.3.2 muestra la distribución de superficies para cada rango de erosión hídrica de acuerdo con la clasificación de la FAO (2007). En la subcuenca de la Laguna de Tuxpan predomina la erosión nula cubriendo el 73.84% de la superficie como se observa en la Figura 3.3.2, y generalmente corresponde a las áreas que están bien cubiertas por bosque de diferentes especies (selva baja y áreas agrícolas en pendientes suaves que no generan erosión hídrica como las de las zonas de riego). Un 9.94% de la superficie presenta tasas de erosión hídrica moderadas que superan las 10 t ha⁻¹ año⁻¹ llegando hasta las 50 t ha⁻¹ año⁻¹, correspondientes a las áreas donde se realizan actividades agrícolas ubicadas en pendientes moderadas pero sin manejo conservacionista. También corresponde a áreas de selva baja que presentan cárcavas que han mermado la cubierta vegetal y donde la erosión hídrica es continua y avanza gradualmente.

El 13.5% de la superficie presenta tasas de erosión que superan las 50 t ha⁻¹ año⁻¹, con 3 sitios de alta vulnerabilidad: (a) parcelas agrícolas, en laderas con pendiente superior al 15%; (b) “zona inestable”, de vulnerabilidad y fragilidad edafológica altas, completamente erosionadas con abundantes cárcavas que tienden a crecer debido a la combinación de alta fragilidad edafológica con el sobrepastoreo; (c) parcelas cerca o al lado de los cauces que conforman la red hidrográfica de la subcuenca, lugar donde ingresan los sedimentos al agua de escurrimiento y se transportan aguas abajo afectando la infraestructura hidroagrícola y azolvando finalmente la Laguna de Tuxpan.

Cuadro 3.3.2. Mapa de erosión hídrica actual de las subcuencas de la Laguna de Tuxpan y El Tomatal

Tasa de erosión hídrica (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Clase	Superficie	
		ha	%
0-5	Nula	5104.80	73.84
5-10	Ligera	188.33	2.72
10-50	Moderada	687.22	9.94
50-200	Alta	768.32	11.11
>200	Muy alta	164.98	2.39
Total		6,913.65	100.00

(Modificada de IMTA 2013).

3.3.6 Estimación de sedimentos

Se da el nombre genérico de producción de sedimentos a las partículas de las rocas, o el suelo, que son acarreados por los escurrimientos y que, finalmente, se depositan en lagos, embalses, planicies y hasta en el mar, después de su acarreo a lo largo de los cauces. Los sedimentos se estiman con la metodología propuesta por Williams (1975). Se requiere entre otros la estimación del escurrimiento medio y máximo.

3.3.6.1. Escurrimiento medio

Para calcular el escurrimiento medio en las subcuencas pequeñas o áreas de drenaje reducidas, es necesario conocer el valor de la precipitación media, el área de drenaje y su coeficiente de escurrimiento. La fórmula a utilizar fue la siguiente:

$$V_m = C A P_m \quad (2)$$

Dónde:

- V_m = Volumen medio que puede escurrir (m^3).
- A = Área de la subcuenca (ha).
- C = Coeficiente de escurrimiento (adimensional), obtenido de cuadros según pendiente, textura y uso del suelo.
- P_m = Precipitación media (mm).

El área de drenaje se obtiene de las cartas topográficas. El coeficiente de escurrimiento se estima en cuadros. La precipitación media anual proviene de los datos de las estaciones climatológicas, o se delimita el área de estudio sobre los mapas de isoyetas anuales de la República Mexicana. Estos datos se introducen en la ec. (3) para calcular los volúmenes medios anuales escurridos.

3.3.6.2 Escurrimiento máximo

Las obras de excedencia se diseñan considerando el escurrimiento máximo instantáneo, estimado para diferentes periodos de retorno por el método racional modificado, o el de las Curvas Numéricas (CN) del Servicio de Conservación del Suelo del Departamento de Agricultura de los EUA. Los datos utilizados son la precipitación por evento, o la máxima para un periodo de retorno deseado, el escurrimiento medio y el potencial de retención de agua máximo del suelo (S). Es factible relacionar a S con las curvas numéricas, puesto que depende de las condiciones del suelo, la vegetación y del manejo de los cultivos.

Las CN son similares al coeficiente de escurrimiento y se basan en hidrogramas procedentes de tormentas en diferentes subcuencas de los EUA. Las CN dependen de la condición hidrológica de la subcuenca, del tipo, uso y manejo del suelo, y de la condición de humedad antecedente.

Las condiciones hidrológicas pueden ser cuatro: (A) Suelo con muy bajo potencial de escurrimiento y alta permeabilidad con infiltración básica de 8-12 mm/h. (B) Suelos con potencial de escurrimiento moderado y bajo con infiltración básica 4-8 mm/h. (C) Suelos con potencial de escurrimiento moderado a alto con infiltración básica 1-4 mm/h. (D) Suelos con potencial de escurrimiento alto, con infiltración básica menor 1 mm/h (Pasolac 2005).

Condiciones hidrológicas del área de drenaje. Este indicador depende de la densidad de la cobertura vegetal: > 75% “Buena”; de 50 a 75 % “Regular”; < 50%. “Mala”.

3.3.6.3. Cuantificación de la producción de sedimentos

Para cuantificar los sedimentos, se utiliza la EUPSM (MUSLE), con la siguiente expresión:

$$Y = 11.8(Q * qp)^{0.56} K * LS * C * P \quad (3)$$

Dónde:

- Y = Sedimentos aportados a una sección del cauce por una tormenta determinada sobre la subcuenca ($t\ ha^{-1}$)
- Q = Escurrimiento medio (m^3)
- qp = Escurrimiento máximo ($m^3\ seg^{-1}$)
- K = Erosionabilidad del suelo ($t\ ha\ h\ MJ^{-1}mm^{-1}\ ha^{-1}$)
- L = Longitud de la pendiente (adimensional)
- S = Grado de la pendiente (adimensional)
- C = Cobertura vegetal (adimensional)
- P = Prácticas mecánicas de control de la erosión (adimensional)

Las subcuencas Laguna Tuxpan directa (A) y Río El Tomatal (B), se subdividieron para este estudio en 32 microsubcuencas, 18 en A y 14 en B, seleccionando 11 para cuantificar la producción de sedimentos (Figura 3.3.3). El criterio para la selección fue el uso del suelo como unidad de escurrimiento en la red hidrográfica. Los escurrimientos directos al lago, definen aquellas microcuencas que cuentan con una red hidrográfica y superficie de suelo agrícola mayores.

De estas 11 microcuencas, 5 desembocan directamente al lago (AB), (AC), (AG), (AK), y (AM), formando la subcuenca A o Laguna de Tuxpan directa, con 3,063.99 ha que corresponden al 75% de la superficie total (naranja y verde); y 5 escurren al Río El Tomatal y de aquí al lago, subcuenca B (BA), (BB), (BE), (BH) y (BL), que juntas forman la microcuenca (BOx) (rosa y amarillo). Las demás microcuencas, (BD), (BF), (BG), (BJ), (BI), (BK), (BM), (BO), (BP) y (BC), cubren el resto dando un total de 912.40 ha. En blanco las microcuencas no utilizadas para el cálculo.

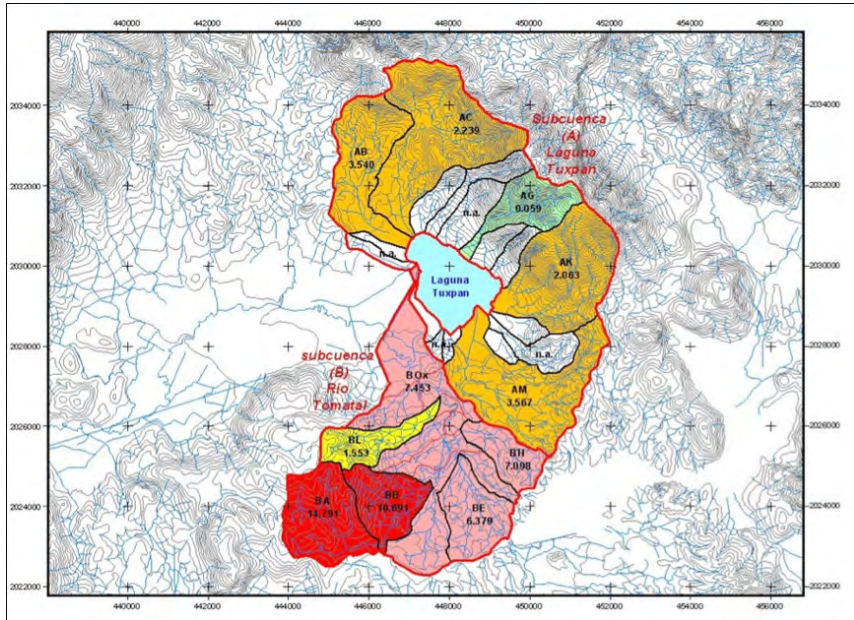


Figura 3.3.3. Microcuencas seleccionadas para el cálculo de sedimentos, en (t/ha).

Nota: en blanco quedan las microcuencas no usadas para el cálculo de los sedimentos. La coloración es la siguiente: blanco - no se usó para cálculo de sedimentos; verde 0 - 1 t/ha, amarillo 1 - 2 t/ha, naranja 2 - 5 t/ha, rosa 5 - 10 t/ha, rojo intenso > 10 t/ha (Modificada de IMTA 2013).

3.4 RESULTADOS

Los datos requeridos para el cálculo de escurrimientos y sedimentos son: superficie de la microcuenca, longitud del cauce principal (m), desnivel del cauce principal (m), pendiente media (longitud/desnivel del cauce principal), pendiente media del terreno y precipitación media diaria (estación 12-222–Laguna de Tuxpan; Cuadros 3.4.1 y 3.4.2).

Cuadro 3.4.1. Producción de agua y sedimentos en las microcuencas seleccionadas

#	Micro sb	PP (mm)	Q (mm)	Q total (x1000 m ³)	qp (m ³ /s)	Sedimentos		PP total (x1000 m ³)
						(t/ha)	t(x1000)	
1	AB	977.5	22.2	111.7	9.22	3.540	1.80	4,919.10
2	AC	977.5	11.2	96.7	12.38	2.239	1.9	8,438.2
3	AG	977.5	10.4	28.1	6.69	0.059	0.0	2,645.8
4	AK	977.5	10.8	72.9	12.88	2.063	1.4	6,579.8
5	AM	977.5	20.8	156.5	10.67	3.567	2.7	7,367.4
6	BA	977.5	49.1	218.8	19.78	14.791	6.6	4,357.0
7	BA+BB	977.5	41.7	307.2	17.87	10.691	7.9	7,208.4
8	BE	977.5	47.7	154.4	9.48	6.379	2.1	3,163.9
9	BH	977.5	52.9	106.6	8.11	7.098	1.4	1,968.8
10	BL	977.5	25.9	56.8	6.52	1.553	0.3	2,144.3
11	BOx	977.5	42.3	1,058.9	25.37	7.453	18.7	24,494.4

Sb – subcuenca; Q = Caudal; qp = caudal máximo; (Modificada de IMTA 2013).

Las microcuencas presentan resultados distintos debido sobre todo al uso predominante del suelo. Las subcuencas A y B juntas producen anualmente 1.058 Millones de m³ de escurrimiento y 56,600 t al año de sedimentos, que salen de las subcuencas a través de los cauces y se sedimentan en las partes bajas.

Cuadro 3.4.2. Resultado de la estimación de la producción de sedimentos

#	Micro subcuenca	Degradación específica (t/ha)	Erosión hídrica en parcela (t/ha)	Exportación de Sedimentos (%)	Escurrimiento medio mm	Escurrimiento máximo m ³ /s	Producción de sedimentos t/ha
1	AB	3.54	21.682	16.33	3.54	9.22	3.54
2	AC	2.239	18.292	12.24	2.239	12.38	2.239
3	AG	0.059	1.417	4.16	0.059	6.69	0.059
4	AK	2.063	13.142	15.69	2.063	12.88	2.063
5	AM	3.567	27.015	13.2	3.567	10.67	3.567
6	BA	14.791	55.354	26.72	14.791	19.78	14.791
7	BA+BB	10.691	44.422	24.07	10.691	17.87	10.691
8	BE	6.379	39.197	16.27	6.379	9.48	6.379
9	BH	7.098	42.837	16.57	7.098	8.11	7.098
10	BL	1.553	16.525	9.40	1.553	6.52	1.553
11	BOx	7.453	33.068	22.54	7.453	25.37	7.453

(Modificada de IMTA 2013).

La subcuenca A presenta las menores tasas de escurrimiento (mm), y de producción de sedimentos, a pesar de las pendientes elevadas en los cauces y los escurrimientos máximos. Se observa que de 977.5 mm de precipitación promedio anual, solamente de 41 a 52 mm se transforman en escurrimiento, que arrastra 11.22 t ha⁻¹ de sedimentos. Esto se debe a los tipos de suelo y la vegetación que permiten una alta infiltración. Este escurrimiento “limpio” llega al lago para abastecerlo y mantener su capacidad.

En cambio, solo la microcuenca BA del río produce 14.8 t ha⁻¹ de sedimento al año lo que equivale a verter al lago 7.45 t ha⁻¹ de toda la subcuenca. Las

otras microcuencas aportan anualmente: BB 10.69 t, BO (desde la BC hasta la desembocadura BP) 7.453 t, y BH 7.098 t (área con suelos muy vulnerables a la erosión), debido a que los productores no aplican prácticas conservacionistas en la producción agrícola. Es aquí donde se deben impulsar programas de promoción y adopción de prácticas conservacionistas específicas para una condición dada y para cada terreno.

3.4.1 Situación actual y análisis de la utilización de agroquímicos en la subcuenca de la Laguna de Tuxpan, Gro.

El estado actual del uso de agroquímicos para la producción del maíz (el más importante en la subcuenca), y los posibles contaminantes que pueden afectar la calidad del agua en la zona, se generó a partir de la revisión bibliográfica, las visitas de campo y entrevistas a productores de diferentes comunidades de la subcuenca y casas comerciales en Iguala (Gro.), donde los productores adquieren los agroquímicos y proporcionan información del uso de agroquímicos (Cuadro 3.4.3). Los productores utilizan semillas “híbridas”, de diversas variedades, y un mínimo de semillas criollas, por experiencia se logran mejores rendimientos y cosechas.

Cuadro 3.4.3. Principales agroquímicos utilizados en la subcuenca de la Laguna de Tuxpan

Producto	Ingrediente activo	Aplicación
Hurandon	No especificado	Líquido - Tratamiento de la semilla
Reyen	No especificado	Tratamiento de semilla
Alectus	No especificado	Tratamiento de semilla
Granulado-granulin	Diazinón	Plaga
Cantor granulado	No especificado	Plagas de suelo
Alectus	No especificado	Plagas de suelo
Azteca	No especificado	Plagas de suelo
Secafin	Glifosato	Herbicida
Anaquat	Paraquat	Solución acuosa (herbicida)
Focus	2-4 D	Herbicida para hoja ancha
Primagram	Atrazina	Herbicida para hoja ancha y angosta
Azufre al 93%	No especificado	Fungicida

Rogor	Dimetoato	Insecticida tóxico
Cima	Cipermetrina	Insecticida
Graneril	Malatión	Insecticida
Foley 2 %	Paratión metílico	Insecticida en polvo Foliar
Foley rey	Clorpirifos etil + per- metrina	Insecticida
Sulfato de amonio	Nitrógeno 21%	Fertilizante
Urea	Nitrógeno 46%	Fertilizante
DAP 18-46 granulado	Nitrógeno 18%, Fósforo 46%	Fertilizante
Cloruro de Potasio	Potasio 60%	Fertilizante
Zeaton	Nitrógeno, potasio, calcio, zinc, bromo, magnesio, manganeso, azufre.	Fertilizante foliar 200 L de agua para una hectárea
Super foli-plus	No especificado	Foliar Bioestimulante
Phyto-Oligo	Nitrógeno, hierro, man- ganeso, zinc, cobre, boro, magnesio	Fertilizante foliar
Phyto Green	Nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, azufre, hierro, manganeso, zinc, cobre, boro, magnesio	Fertilizante foliar
Celebrity	Nitrógeno, potasio y aminoácidos	Fertilizante foliar
Bomen	Nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, azufre, hierro, manganeso, zinc, cobre, boro, magnesio	Fertilizante foliar
Penetrat pH	Polioxietilénico y ácido fosfórico	Coadyuvante, adherente (baja el pH)

Fuente: entrevista de estudiantes de la UAG a casas comerciales de Iguala, Guerrero; (Modificada de IMTA 2013).

3.4.2. Fertilizantes

Los rendimientos de cada cosecha son cada vez más bajos debido al empobrecimiento paulatino del suelo, por la extracción de los nutrimentos. Sin el uso de fertilizantes y sin la incorporación de materia orgánica, el suelo infértil produce menos, tiene menor cubierta vegetal y está más expuesto a la erosión. Los fertilizantes son compuestos que proporcionan los nutrientes para las plantas: nitrógeno, fósforo y potasio; individualmente (fertilizantes “simples”), o en combinación (fertilizantes “mixtos”). Entre los fertilizantes más utilizados en la subcuenca A (Tuxpan), se tiene al sulfato de amonio, la urea y el fosfato-di-amónico (DAP 18-46), también se aplica nitrato de amonio con calcio, y cloruro de potasio (Boohooi 1992).

El DAP, es un fertilizante mixto que aporta nitrógeno y fósforo, adecuado para suelos ricos en potasio y para cereales de invierno, exigentes en fósforo. El DAP es un elemento básico en los abonos “blending” mezclado, principalmente, con cloruro de potasa y, a veces, con abonos nitrogenados. El nitrógeno presente en forma amoniacal, y su interacción con el fósforo facilita su absorción, y este es 100 % asimilable por las plantas y 95 % soluble en agua, lo que garantiza el resultado, pues los cereales absorben fósforo en los primeros momentos, cuando se ve atenuado por las bajas temperaturas del suelo (Frink 1999). El DAP tiene un efecto residual ácido sobre los suelos, aunque inicialmente tiene una reacción alcalina, por lo que son muy adecuados para suelos neutros o básicos. El Zeaton abastece a la planta con micronutrientes como fertilizante foliar (abastece N, K, Ca, Zn, Br, Mg, Mn, S), Phyto- Oligo (N, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mn), Phyto Green (N, P, K, Ca, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mg), Bomen (N, P, K, Ca, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mg).

3.4.3. Herbicidas

Las malezas se combaten aplicando herbicidas. En la subcuenca de la Laguna de Tuxpan los principales herbicidas e ingredientes activos que se utilizan son:

Focus – 2-4 D. Ingrediente activo: Carfentrazone (etil y 2, 4-D amina). Familia Química: Triazolinona (Carfentrazone etil), Fenoxi clorinado (2, 4-D amina). Fórmula: $C_{15}H_{14}N_3O_3F_3Cl_2$ (Carfentrazone etil), $C_8H_6Cl_2O_3$ (2, 4-D amina) Sinónimos: Carfen-

trazone etil: FMC 116426; F8426; 2-cloro-3-[2-cloro-4-5-[4-(diflorometil)-4,5- dihidro-3-metil-5-oxo-1H-1,2,4-triazol-1-il]-4-fluorobenceno propanoato 2, 4-D amina: Sal dimetilamina del ácido 2,4- diclorofenoxiacético.

Paraquat-anaquat. 1,1'-Dimetil-4,4'-bipiridilo No. CAS: 4685-14-7. Sinónimos: 4,4'-Bipiridinio, 1,1'-Dimetil-; Dextrone; Dextrone X; N,N'-Dimetil-4,4'-Bipiridinio; 1,1'-Dimetil-4,4'-Bipiridinio; 1,1'-Dimetil-4,4'-Bipiridinio Catión; N,N'-Dimetil-4,4'-Bipiridinio Dicatió; Sal de 1,1'-Dimetil-4,4'-Bipiridinio; 1,1'-Dimetil- 4,4'-Bipiridildiilio; N,N'-Dimetil-Gama,Gama'-Dipiridlio; Esgram; Gramoxone; Methyl viologen (2+); Paraquat Dicatió; Paraquat Ion; nombre comercial Weedol, formulación (%). Herbicida de contacto con acción quemante, en principio inhibe los procesos fotosintéticos; sólido incoloro o amarillo e inodoro. Es soluble en agua pero prácticamente insoluble en disolventes orgánicos. Tiene persistencia hasta 3 años en el medio ambiente (Madeley 2003).

Primagran (Atrazina). Composición Atrazina * 37 % p/v (370 g/L) S-Metolacloro ** 29 % p/v (290 g/L). Coformulantes, c.s.p. 100 % p/v (1 L) * 6-cloro-N 2 -etil-N 4 -isopropil-1,3,5-triazina-2,4-diamina ** S-metolacloro es una mezcla de: (aRS,1S)-2-cloro-6'-etil-N-(2-metoxi-1-metiletil)aceto-o-toluidida 80% (mínimo) (aRS,1R)-2-cloro-6'-etil-N-(2-metoxi-1-metiletil)aceto-o-toluidida 20% (máximo). Herbicida de pre-siembra selectivo para cultivo de maíz, especialmente indicado para el control de malezas anuales de hoja ancha y angosta o gramínea.

Madeley (2003) señala que tiene un efecto residual de 3-5 meses, con lo cual controla malezas de germinación tardía. La formulación de PRIMAGRAM® contiene una alta proporción del isómero más activo de Metolacloro (S-Metolacloro), lo cual permite un control efectivo de las malezas para las cuales se recomienda, utilizando una menor cantidad de ingrediente activo por unidad de superficie.

Secafin (Glifosato). Glifosato: Sal isopropilamina de N-(fosfometil)-glicina con no menos de 74 % de N-(fosfometril)-glicina. Herbicida no selectivo, de amplio espectro, sistémico, de acción foliar, ingresa a la planta a través de las hojas para migrar a otras partes del tejido vegetal, donde será mínimamente metaboli-

zado. El glifosato inhibe la biosíntesis de aminoácidos aromáticos en las plantas (triptófano, fenilalanina y tirosina) reduciendo la producción de proteína y así el desarrollo de la misma (Madeley 2003).

Dragón 5 WC (Iodosulfuron). Iodosulfurón = ({[5-yodo-2-(metoxicarbonil) fenil]sulfonil} carbamoil)(4-metoxi-6-metil-1,3,5-triazin-2-il) azanida de sodio; Metil 4-yodo-2-[[[(4-metoxi-6-metil-1,3,5-triazin-2-il)amino]carbonil]amino]sulfonil] benzoato de sodio; 4-yodo-2-[3-(4-metoxi-6-metil-1,3,5-triazin-2-il)ureidosulfonil] benzoato de sodio; Iodosulfuro metil sodio; Iodosulfuron metil, sal de sodio; Iodosulfuron-methylsodium; ($C_{14}H_{13}IN_5NaO_6S$). Es un herbicida del grupo de las Sulfonilureas.

3.4.4 Insecticida – Plaguicidas

Entre los insecticidas que se utilizan en la subcuenca de la Laguna de Tuxpan tenemos los siguientes:

Diazinón. 0,0-dietil 0-(6-metil)-2-(1-metil etil)-4-pirimidinil fosforotioato. Nombre común Diazinón, plaguicida organofosforado para controlar insectos en el suelo, en plantas ornamentales y en cosechas de frutas y hortalizas. La sustancia pura es un aceite incoloro prácticamente sin olor. El diazinón para uso comercial es un líquido pardo pálido a oscuro. Se vende bajo los nombres registrados de Alfatox, Basudín, AG 500, Dazzel, Gardentox, Knoxout, granular (COFEPRIS 2009).

Rogor. Nombre químico: - O,O-dimetil - S-metilcarbamoilmetil fosforoditioato (dimetoato). Nombre común: dimetoato (BSI, E-ISO, ANSI, JMAF). Folcisteína (BSI, E-ISO, ANSI, JMAF). Clasificación química: organofosforado. El rogor se encuentra en forma sólida: cristales incoloros de olor característico, se usa como insecticida terapéutico para semillas.

Furadán. Carbofuran: 2,3-dihidro-2,2-dimetil-7-benzofuranil-metil carbamato. El furadán es un insecticida y nematicida sistémico y de contacto, a base de carbofurán, suspensión concentrada, fácilmente dispersable en agua, especialmente indicado para el control de insectos y gusanos en tratamiento de suelo, también se indica para nemátodos de los géneros *Ditylenchus*, *Aphelenchus* y

Meloidogyne. El furadán es absorbido a través de las raíces a toda la planta, actuando contra las plagas para las que está recomendado durante los primeros estadios del cultivo, protegiéndolo desde la germinación y emergencia hasta su implantación definitiva. Es necesaria buena humedad del suelo para la acción del producto (COFEPRIS 2009).

Cima (Cipermetrina). (1RS)-cis,trans-3-(2,2-diclorovinil)-2,2-dimetilciclo propano carboxilato de (RS)-ciano-3-Fenoxibencilo (IUPAC). ($C_{22}H_{19}Cl_2NO_3$). Insecticida de contacto y de ingestión.

Graneril (Malation). 2-[(dimetoxifosforotioil)sulfanil]butanodioato de dietilo ($C_{10}H_{19}O_6PS_2$). Insecticida organofosforado de amplio espectro. Por contacto, ingestión e inhalación.

Foley Rey (Clorpirifos etil+ permetrina). Mezcla de: Clorpirifos = O, O-dietil O-3,5,6-trichloropyridin-2-il fosforotioato ($C_9H_{11}Cl_3NO_3PS$). Permetrina = 3-Phenoxybenzyl- (1RS)-cis,trans-3-(2,2-dichlorovinyl) -2,2 dimethyl cyclo propane carboxylate.

Foley 2 % (Paration metílico). Paration metílico = O,O-dimetil-0-(4-nitrofenil fósforotioato (Bonilla 2010).

3.4.5. Fungicidas

Los fungicidas se emplean para impedir el crecimiento o para matar los hongos y mohos perjudiciales para las plantas, los animales o el hombre. En el área de estudio se utilizan los siguientes fungicidas:

Azufre 93% agrícola. El azufre 93% es un fungicida-acaricida, se presenta como polvo seco, básicamente de azufre.

3.4.6. Tratamiento para semillas

Alectus (Bifentrina + Imidacloprid). Bifentrina = (1 alfa, 3 alfa, - (Z)) - (+) - (2 metil (1,1 -bifenil) -3-il) metil 3- (2-cloro - 3,3,3 - trifluoro - 1 - propenil) - 2,2 dimetil ciclopropano carboxilato. Imidacloprid = N-[1-[(6-Chloro-3-pyridyl) methyl]-4,5-dihydroimidazol-2-yl] nitramida ($C_9H_{10}ClN_5O_2$) insecticida neoni-

cotinoide. En conjunto actúan por contacto e ingestión, presentando una acción sistémica proporcionada por el imidacloprid.

3.4.7. Adherentes

Líquido aplicado en la superficie de las hojas para permitir la adhesión de todos los demás productos agroquímicos, sin interferir o reaccionar con éstos. No ocasiona enfermedades, cambios físicos o químicos en los cultivos donde se emplea. Se aplica:

Penetrat pH. Es un bufer acondicionador de pH y basado en un balance de acidificantes y surfactantes no iónicos activados con dispersantes humectantes y reductores de la conductividad del agua. Su función principal es lograr a la vez el cambio de pH de una solución según el producto disuelto, la adherencia, la penetración, la dispersión, la inhibición de espumas, la humectación (para polvos) y la emulsión (para productos formulados con aceites).

PENETRAT•PH® es 100% soluble en agua bajo condiciones de temperatura ambiente, generando una reducción en el pH que varía de 1 a 2 puntos por c.c. de PENETRAT•PH® agregado por litro de agua.

3.4.8 Sistema de Producción de Maíz

En la subcuenca de la Laguna de Tuxpan, el cultivo principal en 2013 fue el maíz de temporal. De acuerdo a las entrevistas realizadas, su sistema de producción es:

Preparación del suelo: Regularmente, las labores culturales de preparación del terreno y siembra del maíz con maquinaria. En suelo erosionado se realiza solo el barbecho para no perder suelo en la temporada de lluvia. En terrenos planos y menos erosionados se rastrea y barbecha (Mitasova 2001).

Siembra: Se siembran variedades híbridas y muy pocas personas utilizan semillas criollas, debido a que el rendimiento con semillas criollas es de alrededor de 2.5 ton/ha comparado con las semilla de variedad, que logran hasta 6 ton/ha con un manejo adecuado. La época de siembra es la última semana de junio a la primera de julio, para obtener la cosecha en el mes de diciembre. Las variedad de semillas sembrada son: 35, 535, Tehuacán, 363. Las semillas

seleccionadas regularmente son: tornado, pionner, piedra cal. Su venta es por costales de 25 kg los cuales contienen en promedio 5,000 semillas. Una hectárea se siembra en un día con la sembradora.

Fertilización: Se utiliza en promedio de 500 a 600 kg/ha, principalmente de sulfato de amonio (400-500 kg) y DAP (fosfato diamónico, 18-46-0) granulado (200 kg). La aplicación de la primera fertilización se realiza junto con la siembra; a los 15 o 20 días se aplica el fertilizante foliar BIOSEMIN un litro por ha en promedio, el cual sirve para fortalecer el crecimiento del maíz. Cuando el maíz tiene una altura entre 0.50 a 0.60 m se realiza una segunda fertilización en forma manual, sin realizar escardas. A costo mayor, se obtienen mejores resultados si se aplica cloruro de potasio y DAF (Gavi 2010).

Herbicidas: Se aplica un herbicida que impide que broten las semillas de malezas junto a los cultivos (sellador) tres días después de la siembra. El herbicida Dragón es uno de los más usados desde tiempo atrás, aunque comentaron algunos agricultores que en el mercado cada vez hay nuevas presentaciones de los mismos. El Faena es un producto que en los últimos años es menos eficiente porque argumentan que esta diluido, se aplica para eliminar la maleza huizapol (*Cenchrus echinatus L.*).

Plagas: Entre las principales plagas se encuentra el gusano de alambre y la gallina ciega, las cuales afectan de manera severa los cultivos en su etapa inicial. Por ello al momento de la siembra se aplica en los surcos el insecticida granulado comercialmente llamado Azteca o Diazinon, junto con el fertilizante y la semilla. Dependiendo de la semilla se requiere o no la aplicación del insecticida. La semilla híbrida tiene un costo mayor pero no requiere aplicación porque ya trae el tratamiento. Otra plaga es el gusano cogollero, principalmente en la etapa inicial de desarrollo cuando la planta tiene menos de 50 cm de altura (Díaz 2013).

Almacenamiento de cosecha: Después cosechar y obtener los granos de maíz, estos se almacenan en costales y se les aplica pastillas para evitar la aparición de gorgojo y palomilla.

Riego: En menor cantidad, se practica en las zonas de riego localizadas principalmente en las partes bajas de la subcuenca en las comunidades de Tuxpan y Tomatal. Se aplican regularmente de 2 a 3 riegos por cada ciclo del cultivo.

En la subcuenca se distinguen 2 áreas compactas con problemas erosivos y de producción de azolves: la “Zona inestable con Cárcavas” y la “Zona Agrícola de Laderas” (Figura 3.4.1).

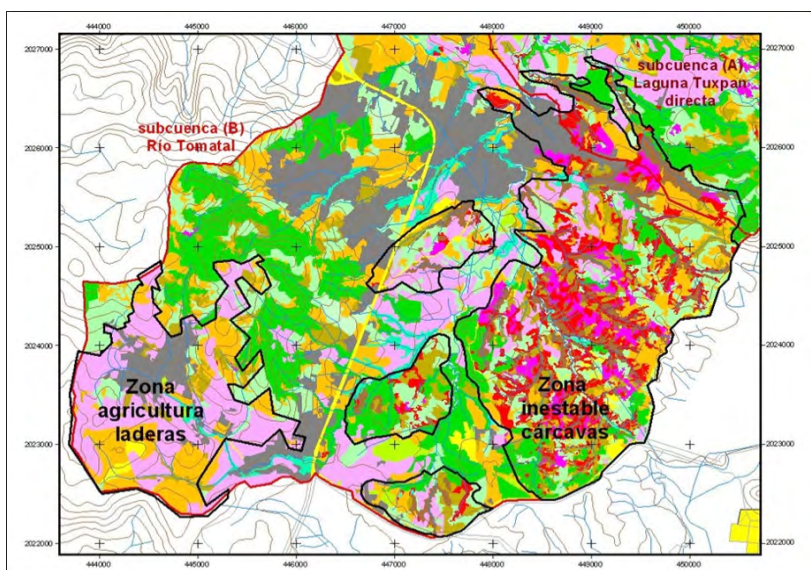


Figura 3.4.1. “zona inestable” y “zona de agricultura de laderas”: detalle del uso de suelo 2013 (modificada de IMTA 2013).

Nota: verde oscuro = forestal densa; verde claro: forestal alterado; amarillo = agricultura con prácticas; naranja = agropecuario y agricultura nómada; rosa = agricultura intensiva permanente; café oscuro = sistemas productivos asociados con cárcavas y erosión fuerte; rojo intenso = sin vegetación, cárcavas, zonas erosionadas o en proceso de erosión fuerte; gris = zonas urbanas, infraestructura

3.5 DISCUSIÓN

En la sub-cuenca de Tuxpan, la producción de maíz depende mucho de los agroquímicos. La prevención de malezas, plagas y enfermedades del maíz, resulta esencial para evitar pérdidas en calidad y rendimiento del grano. Los agricultores opinan que la resistencia de las plagas a los agroquímicos requiere cambiarlos continuamente por productos nuevos y aumentar su aplicación para sostener el rendimiento de las cosechas, lo que aumenta la dependencia de los agroquímicos e incrementa los costos de producción por la falta de capacitación. Otro problema es la intoxicación inmediata para los aplicadores, además de afectaciones a largo plazo a la población en general por la contaminación generalizada.

Se informa que hasta el año 2012, se contaba con asistencia técnica para la producción de maíz, incluyendo el uso eficiente de los agroquímicos y la fabricación y uso de abonos orgánicos. Aunque se les capacitó en la elaboración de composta, no se adaptó porque da resultados a largo plazo, y en el momento representa un costo mayor en mano de obra, por lo que su uso es limitado.

3.5.1 Propuesta de Manejo Conservacionista para las Subcuencas

Adaptación del sistema de uso y manejo del suelo, según su aptitud

En las áreas con mayor pendiente y suelos muy erosionables se sugiere conservar en forma permanente la cubierta de selva baja caducifolia en la subcuenca de Tuxpan, cuya parte norte mantiene una densa selva baja (cerro de Tuxpan, El Jumil y la sierra al norte del poblado de Platanillo y el lomerío alrededor del poblado de Abrazo de Acatempan).

Zona Inestable (microcuencas (AM) sur, (BH), (BE) y (BC))

Aunque las pendientes de esta zona aparentemente son suaves y las longitudes de las pendientes son cortas, los suelos son altamente erosivos. La mayoría de los suelos están erosionados y en toda la zona abundan las cárcavas. La agricultura en esta zona ya no es posible, salvo en algunas zonas reducidas, en especial algunos altiplanos entre barrancas manteniendo prácticas de conservación de suelo muy estrictas, como las barreras vivas por las orillas de las parcelas, prohibir sembrar sobre cualquier ladera, y mantener unidades de producción pequeñas para controlar cualquier anomalía de pérdida de suelo posible durante eventos específicos de precipitación. Mantener la cubierta vegetal densa todo el tiempo, sembrar en asociación de cultivos (maíz con frijol y calabaza).

La restauración vegetal, se puede lograr sembrando simultáneamente pastos y leguminosas herbáceas adaptadas, y reforestar simultáneamente con especies arbustivas arbóreas adaptadas a las condiciones locales (Pasolac 2005). Hay que mencionar la importancia de una planta pionera que ya se encuentra en la zona, *Muntingia calabura*, para la restauración de cárcavas y en las partes más erosionadas; Acacias (*Acacia farnesiana*, *A. cymbispina*, *A. schaffnerii*, *A. cornegiera*) en partes menos erosionadas; y *Prosopis juliflora* en el fondo de las barrancas al lado de *M. calabura*. Otras especies son *Leucaena leucocephala*, *Cercidium praecox* y *Pithecellobium dulce*.

En zonas menos erosionadas se pueden plantar estacas de *Erythrina* sp., *Gliricidia* sp, y *Jatropha curca*; además del árbol neem (*Azadirachta indica*), este último sirviendo como fuente de materia prima para el combate a las plagas agrícolas.

Cerca de los cauces también se puede plantar *Populus* sp., *Salix* sp. y *Taxodium mucronatum*. En los cauces, donde haya humedad se pueden plantar estacas de *Salix* sp. (sauce), y de *Arundo donax* (carrizo), Figura 3.5.1

Actualmente la agricultura se ha ido abandonando debido a la pérdida paulatina de suelos y sigue el sobrepastoreo. En el fondo de las cárcavas donde no tiene acceso el ganado se puede observar a *Muntingia calabura* (Figura 3.5.1). Para la restauración vegetativa de la zona, se requiere la propagación sistemática de

esta especie dentro de las cárcavas, asociada con la exclusión temporal de todo el ganado. La especie puede reproducirse en viveros con semillas de menos de 30 días de cosechadas, sin enterrar, expuestas al sol, y propagarse por siembra directa. También se pueden plantar esquejes directamente o a través de acodos.

Se requiere un tratamiento integral para las cárcavas tipo “Traje a la medida”, que combine prácticas vegetativas (restauración forestal, empastamiento, estacas retonables), con obras civiles (represas filtrantes de gaviones, piedras acomodadas y otros), y cabeceo (suavizar las paredes de las cárcavas) (ver Control y Cabeceo de Cárcavas).



Nota: A la izquierda: erosión subterránea; sitio: sur de la microcuenca (AM). En medio: desarrollo espontáneo en el fondo de la cárcava de *Muntingia calabura*; sitio: sur de la microcuenca (AM). A la derecha: vista general sobre la “Zona inestable de cárcavas”; sitio: al oriente de la microsubcuenca (BE).

Figura 3.5. 1. Problema de la zona inestable por la formación de cárcavas (microsubsubcuencas AM SUR, BH, BF, BE Y BC), (Fuente: IMTA 2013).

La agricultura en Laderas

La zona agrícola de laderas incluye la microcuenca BA, Tepochico, como área compacta mayor, y superficies menores en la AM oriente, Tuxpan, ALB, Colonia El Mirador, AB sur y algunas parcelas aisladas en la AB norte, alrededor de Platanillos, y AC norte. Muy pocas de estas parcelas en suelos relativamente estables cuentan con prácticas adecuadas de conservación. Se recomienda el surcado al contorno en pendientes del 3 al 12% (ver Surcado al Contorno); surcado al contorno con barreras vivas en pendientes del 12 al 30 % (ver Barreras Vivas), cambio de uso del suelo a cultivos arbóreos maderables y frutales en pendientes mayores al 30%, y restauración forestal en pendientes superiores al 40% (ver Restauración Forestal).

Junto con el surcado al contorno y las barreras vivas, se recomienda mantener una buena cubierta vegetal dentro de la parcela agrícola, incluyendo la asociación de cultivos (vg. calabaza debajo del maíz para tener buena cobertura del suelo); además de prácticas como la labranza mínima, la labranza cero, ambas asociadas con la no remoción de los residuos de cosecha y con la siembra de abono verde para la formación de mulch, sobre el cual se efectúa la siembra. Además, la plantación del árbol neem (*Azadirachta indica*), para controlar plagas de los cultivos, disminuir la contaminación por plaguicidas y bajar los costos de producción. Se puede plantar en las orillas o dentro de las parcelas como cerco vivo o para reforzar las barreras vivas.

Existen conocimientos básicos y experiencias en el manejo de las especies en la Laguna de Tuxpan. En la Figura 3.5.2 se observa un surcado en contorno (izquierda, microcuenca BC) y barreras vivas (derecha, microcuenca BA, zona Topochico). Sin embargo, las barreras vivas van sobre los linderos de las parcelas, no son sistemáticas ni se adaptan en su totalidad a las curvas de nivel.

Surcado al Contorno

Es indispensable adaptar el surcado a la topografía del terreno. Debe ser un surcado casi a nivel, con pendiente uniforme. Ideal es contar con una pendiente de 0.25%, (con una diferencia de altura de 25 cm a una distancia de 100 m), para que el



Figura 3.5.2. Prácticas actuales de agricultura de ladera observadas (fuente IMTA 2013).

agua pueda escurrir lentamente e infiltrarse sin acumularse ni erosionar el suelo. Se recomienda en cualquier clase de cultivo y terreno con pendiente menor al 30 % (si es mayor no debe ser agrícola). Si la pendiente se incrementa, es prioritario surcar al contorno para evitar la pérdida irreversible de suelo y nutrientes y lograr mayor infiltración de agua. En la mayoría de los casos, no se lleva a cabo debido a que el operador del tractor rentado genera los surcos sin adaptarse a la topografía. Otras labores del cultivo, como limpieza y aporques, se hacen de la misma manera.

Una forma sencilla de encontrar la curva de nivel es con el “Agro- Nivel “A”” y cinta métrica, ajustando la línea de curva de nivel encontradas a una línea de 0.25% de pendiente uniforme: cada 10 m debe de tener 2.5 cm menos de altura que la curva de nivel. La primera vez se recomienda surcar esta línea con caballo para mayor precisión. Estas líneas guía deben ser permanentes. En pendientes inferiores al 12% se establecen postes permanentes para que el tractorista contratado los vea y respete. Si es mayor, debe plantarse una barrera viva permanente (ver Barreras Vivas), con varias líneas maestras trazadas en medio de la parcela, adaptando los demás surcos a estas. La cantidad de líneas depende de la uniformidad de la topografía del terreno, pero se deben hacer al menos 3 líneas.

Barreras Vivas

Esta práctica consiste en sembrar hileras de plantas perennes o de plantas de crecimiento denso y de buen macollamiento, a pendiente uniforme de 0.25% a casi curvas a nivel (ver Surcado al Contorno). La importancia que tiene esta práctica es:

- Disminuir la velocidad del agua de lluvia que escurre superficialmente.
- Incrementar la infiltración y aumentar por mayor tiempo la humedad en el suelo.
- Disminuir la erosión (pérdidas irreversibles de suelo y nutrientes).
- Intercepción y retención de suelo, hojarasca y nutrientes ya arrastrados.
- Formación de terrazas naturales a través del tiempo.

Son útiles los pastos grandes de raíces profundas. El de mayor eficiencia (hasta 60%), y que no invade las parcelas agrícolas que protege, es *Vetiveria zizanioides* (*Chrysopogon zizanioides*). De eficiencia menor *Pennisetum purpureum* (King Grass, Elefante), *Panicum máximum* (guinea), *Hyparrhenia rufa*, *Cymbopogon citratus* (zacate limón), *Saccharum officinarum* (caña de azúcar) y otros.

También se puede plantar especies útiles, como *Ananas comocuc* (piña), diversos magueyes como *Agave angustifolia*, *A. esperrima*, *A. potatorum*, *A. weberii* (mezcal) y *A. salmiana* (pulque); frutales arbustivos, como el plátano *Musa sp.*, que se ve en la zona de Palmillas; y leguminosas arbustivas, como el frijol *Cajanus cajan* (gandul), cuyas hojas y vaina son forrajeras; y diferentes tipos de nopales (*Opuntia sp.*), tanto para verdura, forraje y fruta.

Las barreras vivas se forman sembrando arbustos y árboles a distancias de 20 a 30 centímetros, en hileras simples o dobles, a lo largo de la curva de nivel, con ramas trenzadas en el pie que ayudan a una mayor retención de suelo. La distancia entre líneas está en función de la pendiente y se calcula con la ecuación de Young (1989):

$$w = 100 / (S + C) \quad (4)$$

W = espaciamiento entre hileras.

C = factor de corrección por erosionabilidad del suelo (C = 1 para textura fina, C = 2 para textura media, C = 3 para arenas finas y limos).

S = pendiente (°)

Los callejones son una forma de barrera viva (“Alley cropping”), donde se plantan, a curva de nivel, hileras de leguminosas arbóreas con buena capacidad de retoñar y se puedan podar. *Leucaena sp.*, *Gliricidia sepium* o *Erythrina sp.*, son ideales. Se plantan cada 25 cm y se dejan crecer el primer año sembrando entre las líneas. Cuando tienen unos 3 m, se podan a 0.5 m de altura antes de la siembra, uniendo los troncos más gruesos de la misma hilera para reforzarla, y el material podado se aplica a la parcela como capa de mulch. Encima de este se siembra por espeque o con mínima labranza. Se recomienda que el espaciamiento entre líneas sea mínimo de 6 m, debido a la producción de mulch. Con el tiempo, las raíces de los árboles profundizan y absorben los nutrientes que aporta la hojarasca

La barrera de árboles y troncos ordenados, y la cubierta de hojarasca, evitan la erosión, aumentan la infiltración, disminuyen el escurrimiento, conservan el suelo, enriquecen al suelo con materia orgánica e incrementan los rendimientos.

Iguala presenta condiciones ideales para establecer a *Leucaena leucocephala*, puesto que es fácil de podar y tiene buena capacidad de restaurar suelos y garantiza altos rendimientos del cultivo.

Otros parámetros de barreras vivas:

- Se pueden establecer de 60 a 100 metros de barrera de zacate por día-hombre.
- Una barrera viva eficiente ocupa una faja de sólo 50 a 60 cm de ancho.
- El zacate *Vetiveria zizanioides* (o los callejones con *Leucaena leucocephala*) produce mulch o forraje de las podas, que ayuda a controlar la erosión y la maleza, conserva la humedad y mejora la condición física del suelo mediante el humus producido. Se estima que 150 a 200 metros de barrera producen forraje para mantener una cabeza de ganado durante el invierno.
- En suelos profundos, las barreras vivas bien establecidas semi-nivelan

el terreno, reduciendo la pendiente hasta en un 50%. La formación de terrazas niveladas se puede lograr al colocar una barrera viva intermedia entre cada 2 barreras originales.

- Si el terreno es pedregoso, se puede combinar la barrera viva con otra de piedras acomodadas, de 0.50 m de altura, incluyendo la cimentación de 0.10 m de profundidad. Se recomienda ubicar la barrera de piedras por debajo de la barrera viva.

Terrazas

Las terrazas son terraplenes perpendiculares a la pendiente formados entre bordos o entre la combinación de bordos y canales construidos con material de excavación. Para ser eficientes, estas obras deben combinarse con prácticas de conservación de suelos, como las zanjas y el manejo adecuado de la vegetación. Las terrazas constituyen una práctica de gran adaptabilidad a diferentes condiciones, como:

- *Clima*: terrazas apropiadas para captar agua, infiltrarla o desalojarla.
- *Erosión*: adaptación a diferentes grados de erosión, aunque sea grave. Inconveniente: el costo puede ser elevado y por tanto no redituable.
- *Topografía*: amplia adaptación; sí bien, a mayor pendiente mayor costo.
- *Pedregosidad*: con piedras se dificulta la construcción mecanizada, pero puede presentar la ventaja de construir las terrazas en forma manual, con material disponible (piedras) para reforzar la contrapendiente.
- *Suelos*: adaptable a todo tipo de suelos, siempre que sean profundos. No es apto para suelos someros.

En la subcuenca de Tuxpan, los productores pueden incorporar a los sistemas de producción las terrazas de formación paulatina, con la modalidad de plantar en el bordo barreras vivas con especies vegetativas (frutales, nopales, pastos, etc.).

Terrazas de formación paulatina o sucesiva con especies vegetativas

Estas terrazas requieren la construcción de un bordo con plantilla de 0.80 a 1.30 m, sobre el cual se establece una barrera viva para su estabilización, con vegetación perenne y densa (ver Barreras Vivas). Se puede usar pasto *Vetiveria zizanoides*, nopal (*Opuntia sp.*), maguey (*Agave sp.*) o arbustos de crecimiento denso, como *Baccharis sp.*, además de especies pioneras, como *Muntingia calabura*. Con la formación del bordo, se logra la primera etapa de la terraza de banco. No se deben sembrar cultivos agrícolas en el bordo.

El bordo debe conservarse y sobre-elevarse para acelerar la formación del bancal, volteando el suelo labrado hacia abajo (tomar el suelo desde arriba del bordo), o voltearlo hacia arriba (tomar el suelo desde abajo). El bordo de contención debe sobre-elevarse constantemente.

Estas terrazas se adaptan a terrenos con suelos profundos con pendiente mayor al 6%. Su construcción es factible bajo cualquier régimen pluvial, puesto que el bordo puede construirse a nivel o considerando una pendiente de desagüe de 0.25%. Es indispensable la cubierta vegetativa perenne de alta densidad en el bordo para su estabilización. El bordo debe estar sobre-elevado al terreno circundante para que el tiempo promueva la formación de la terraza de banco. El espaciamiento de las terrazas está en función de la pendiente del terreno, la precipitación, el número de implementos, el ancho de surcos, etc.

La conservación de las terrazas es esencial, si no puede ser causa de cuantiosas pérdidas económicas. Es preferible no construir terrazas, a descuidarlas. Las diversas actividades para la conservación incluyen: (a) evitar el paso del ganado y/o vehículos a través de las terrazas; (b) mantener la capacidad de almacenamiento; (c) recoger las piedras y colocarlas sobre el bordo; (d) plantar y mantener una cubierta vegetativa densa y permanente en el bordo y revisar que esté toda cerrada; (e) revisar visualmente las terrazas de construcción reciente después de lluvias fuertes; (f) realizar las operaciones agrícolas de mantenimiento adecuadas durante la preparación del terreno y las labores de cultivo; (g) controlar las tuzas y otros roedores que cavan en el suelo.

Terrazas de banco

Las terrazas de banco son plataformas a nivel, en serie continua y escalonada, con un terraplén cultivable y un talud formado por el corte y el relleno reforzado. El reforzamiento del desnivel, tanto en el corte como en el relleno, puede ser a través de mampostería, o del empedrado/enrocamiento, combinado con estacas arbóreo-arbustivas retoñables densas. También se puede utilizar mallas clavadas combinadas con estacas retoñables de material herbáceo-arbustivo-arbóreo denso combinado.

Las terrazas son las obras más efectivas para controlar la erosión en laderas. Sus medidas dependen de la pendiente y tipo de suelo. Su alto costo se justifica donde la tierra escasea, la mano de obra está disponible en la época seca, y para la producción de cultivos de alto valor (hortalizas, flores y frutales). En muchos casos se aprovechan con riego en la época seca. Su finalidad es controlar la erosión para usar intensivamente la tierra en laderas. Esta tecnología es apropiada en las siguientes condiciones ecológicas:

- En zonas de alta precipitación, donde la tierra puede infiltrar o desviar fuertes lluvias a lo largo del banco, sin causar problemas de drenaje o de desborde (terrazas a desnivel).
- Los suelos arenosos dificultan su construcción. En caso de que se necesiten, se deben hacer más pequeñas. En suelos de baja infiltración se combinan con prácticas que mejoren la infiltración y aseguren el desagüe con una pendiente de 0.25% a desnivel.
- Se utilizan en suelos profundos. Se pueden realizar terrazas más pequeñas o de media luna, por lo general en cultivos arbóreos de frutales, cafetales o maderables. En suelo pedregoso es más difícil su construcción. Se utiliza una barrera de piedra muerta en la base para fortalecer la terraza.
- La fertilidad del suelo no la limita, ni el pH. En suelos degradados se combina con prácticas que mejoren la fertilidad, como la incorporación de materia orgánica.

- Rescatar la capa fértil del suelo durante la construcción. La parte superior de toda el área se separa, tanto donde se va a hacer el corte, como donde estará el relleno. Este material se coloca sobre el corte y relleno establecido, y se siembra sobre un abono verde para mejorar el suelo y amortiguar las pérdidas de fertilidad durante la construcción.
- Lo más importante es reforzar el talud y el desnivel, que son la esencia misma de la terraza. El borde inferior se protege con una barrera viva; los taludes con mampostería, empedrado, enrocamiento combinado con estacas retoñables, pasto y arbustos densos. Debe revisarse anualmente. En zonas húmedas, debe asegurarse un drenaje libre a lo largo del desnivel y el sistema de desagüe. Se recomienda una inclinación inversa de 3-5% en el momento de la construcción, la cual se va a suavizar con el tiempo.

Control de Cárcavas:

La zona inestable requiere el control de cárcavas, en especial en las microcuencas AM sur; BK completa; BH completa; BF completa; BE completa; BG central; y BC sur; que es casi toda la parte oriental de la subcuenca B, Río El Tomatal.

El control de cárcavas debe iniciar en la parte alta de las subcuencas, procediendo de arriba hacia abajo. Por lo general, toda restauración forestal de cárcavas requiere la exclusión ganadera. Esto es indispensable en la subcuenca de Tuxpan, para estabilizar las cárcavas hasta que regrese la vegetación nativa de la zona.

Cabeceo de la cárcava

Los trabajos de restauración sobre el cauce y ladera arriba se inician donde comienzan las cárcavas. Mediante los datos de precipitación de la zona, se estima la subcuenca de captación con el caudal máximo esperado; se revisa el estado vegetativo y edafológico del cauce aguas arriba; se estima el tipo de restauración forestal que se requiere y la colocación de obras transversales para el control transversal del flujo. El cabeceo se realiza simultáneamente acomodando piedras

en una represa filtrante de gavión con un buen delantal debajo del cauce (la altura del vertedor a 0.5 m), por encima de la base de la cárcava y en el punto debajo de la cabeza; después se suavizan las paredes en la zona de la cabeza; si hay piedras, se empiedra suavizando toda la zona; se siembran pastos y se colocan las estacas de *Erythrina sp.*, *Bursera sp.* (*B. simaruba*, *B. copallifera*, *B. lináloe*) y *Gliricidia sepium*, también esquejes de *Muntingia calabura* retoñables. En los cauces más húmedos se colocan estacas de *Salix sp.*, y matas de *Arundo donax* (carrizo). También se debe sembrar *Acacia sp.* (huizaches de la zona), *M. calabura* y pastizales locales, incluyendo el pasto estrella. Es indispensable la exclusión ganadera absoluta y permanente de la zona de la cabeza y sus alrededores inmediatos (zona oriente de El Tomatal). Para el control de plagas agrícolas deben plantarse de algunos árboles neem (*Azadirachta indica*), preferentemente en los terrenos más seguros y estables.

Represas Filtrantes

Son represas de diferentes materiales que se colocan transversalmente a la dirección del flujo de la corriente, para retener suelo, estabilizar los lechos de las cárcavas, permitir el flujo normal de los escurrimientos superficiales e infiltrar el agua. Deben identificarse previamente los sitios donde se ubicarán. El primer sillar se coloca inmediatamente por abajo de la cabeza de la cárcava. La distancia entre represas se calcula considerando que el pie de la represa aguas arriba esté a la misma altura que la cabeza de la siguiente (distancia pie – cabeza), para que una vez lleno de azolves, se tenga un nivel del cauce controlado casi plano y el flujo entre represas sea lento y no erosivo; esta distancia depende exclusivamente de la pendiente del cauce, contar con un delantal suficiente para recibir la caída del agua, sin que el fondo del cauce se erosione; además debe contar con un vertedor lo suficientemente grande.

Los materiales pueden ser gaviones, piedras acomodadas, geocostales rellenos de suelo, mampostería, estacas retoñables (vg. *Salix sp.*), llantas, etc. Todas requieren empotramiento hacia abajo y hacia las laderas, independientemente del material usado. La selección del material y el dimensionamiento dependen del caudal esperado, de las dimensiones y pendiente del cauce, y de las posibilidades de financiamiento.

Las represas de piedras acomodadas, estacas retoñables y geocostales se ponen en cauces menores (1 a 2.5 m de altura), las estacas retoñables o enterradas, a anchuras no mayores de 3 metros, las piedras acomodadas a no más de 7 metros.

La función inicial es retener los azolves, una vez llenas mantener estable el perfil del cauce mediante el control de la pendiente y velocidad del flujo. El fondo de la cárcava se va estabilizando, integrándose al paisaje.

Para estabilizar el cauce es indispensable restaurar simultáneamente sus laderas con vegetación. Si el cauce es intermitente, se recomienda plantar pastos y especies arbóreas- arbustivas en los sedimentos del fondo (Cuadro 3.5.1).

Cuadro 3.5.1. Recomendaciones para la estabilización de cauces (modificada de IMTA 2013)

Recomendaciones	
Piedra acomodada	<ul style="list-style-type: none"> • Para cárcavas con pendientes máximas de 35%. • La altura total de la estructura no debe exceder 2.5 metros de altura total.
Geocostales	<ul style="list-style-type: none"> • Para cárcavas con pendientes máximas de 35 %. • Con cárcavas pequeñas, menos de 1 m de profundidad y escurrimientos menores. • Para 1 m³ de geocostal se requiere aproximadamente 15 geocostales del tamaño estandar 0.5 m x 0.8 m, preferentemente con apertura de la malla (0.212 milímetros = malla núm. 70) para permitir el crecimiento de vegetación inducida (siembra de pastos) o natural que posteriormente se integra al paisaje y le da mayor estabilidad a la estructura.
Gaviones	<ul style="list-style-type: none"> • El gavión se define como caja o canasta formada por malla de alambre de acero galvanizado, la cual se rellena de piedra con el objeto de formar el cuerpo de la obra que constituye la presa de control. • Para corrientes turbulentas, cuando se quiere evitar el azolvamiento de estructuras hidroagrícolas aguas abajo y/o el control de una cárcava. • Se usa en cárcavas mayores, más profundas, más anchas y con corrientes mayores. • No hay restricción respecto a su tamaño, siempre y cuando lleven suficiente empotramiento hacia abajo y hacia las laderas y un buen delantal. • Para definir la sección de la obra, se requiere de un análisis estructural a través de la sección crítica unitaria y de las condiciones de seguridad para que la obra no caiga, se hunda o se deslice, incluyendo el caudal máximo de diseño (para un periodo de retorno de 10 a 20 años, estimado por el método de sección y pendiente).
Estacas retoñables	<ul style="list-style-type: none"> • Como son los diferentes <i>Salix</i> sp. (sauce), <i>Ficus</i> sp. (amates), o <i>Bursea</i> sp. (palo mulato, copal o lináloe). Se aplican donde abunde la vegetación arbórea. En seguida, se presentan dibujos de colocación de represas filtrantes con estacas retoñables (Schiechl y Stern 2001; Figura 3.5.3).

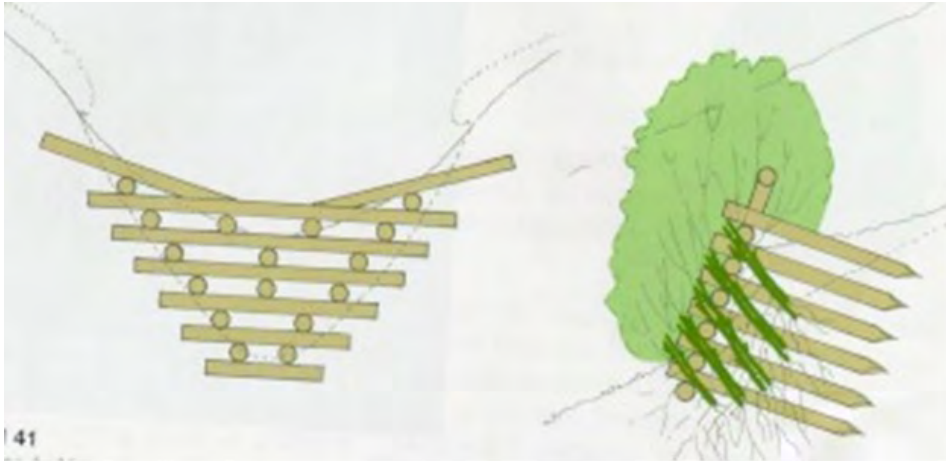


Figura 3.5.3. Colocación de represas filtrantes con estacas reñable fuente: schiechl y stern, 2001, abb. 41

Restauración forestal

Es la restauración de la vegetación arbórea en un terreno degradado, o no apto para uso agrícola, o para establecer una plantación forestal comercial. Se requiere en la zona de la subcuenca inestable, con cárcavas, como parte integral de las obras transversales, pero también en cualquier área agrícola o ganadera con pendientes superiores al 40 %.

Las diferentes formas y técnicas para la restauración forestal dependen del clima, suelo y ecosistema presente; y la capacidad local del control sobre el sobrepastoreo, puesto que requieren la exclusión ganadera temporal o permanente.

Exclusión ganadera

En ciertas condiciones, es suficiente la exclusión ganadera para que el monte se rehabilite solo, sin ninguna otra intervención que construir un cerco de malla densa para evitar la entrada a cualquier tipo de ganado. El sistema es eficiente donde el banco de semillas de monte en el suelo sea suficiente, y el sobrepastoreo

sea el problema de la deforestación y degradación, en especial el caprino. En el caso de la subcuenca El Tomatal, se puede intentar excluir un área dada y observar que pasa con la vegetación, ya que en buena parte existen huizaches y otras especies de la selva baja caducifolia entre las cárcavas, incluyendo al árbol pionero *Muntingia calabura*, que crece en el fondo de las cárcavas más profundas, donde el ganado no tiene acceso.

Exclusión ganadera con inducción forestal natural

A veces es necesario inducir la restauración forestal rastreando la tierra para que las semillas pueden germinar; sembrando pasto y árboles (*Leucaena leucocephala*, *Acacia spp.*, *M. calabura*, *Pithecellobium dulce*); plantando estacas retoñables de *Erythrina sp.*, *Gliricidia sepium*, *Bursera lináloe*, y *Bursera copallifera*, y pencas de Nopal (*Opuntia sp.*).

Reforestación con viveros

Consiste en plantar árboles reproducidos en vivero para establecer vegetación arbórea en terrenos con aptitud forestal, y cuidar su desarrollo para garantizar el éxito y disminuir la erosión. Requiere la exclusión ganadera, el establecimiento de vegetación nodriza para aumentar la tasa de prendimiento de las especies meta. Para la microcuenca de Tuxpan, es recomendable utilizar plantas nativas por su mayor adaptabilidad y rápida colonización: *Leucaena sp.*, *Gliricidia sepium*, *Acacia sp.*, *Pithecellobium dulce*, *Cercidium praecox*, *Bursera lináloe*, *B. copallifera*, *B. simaruba*, *Amphipterygium adstringens* (cochalalate), *Guazuma ulmifolia*, *Muntingia calabura*, *Ceiba aesculifolia*, *Eysenhardtia polystachya*, *Lysiloma acapulcensis*, *Enterolobium cyclocarpum*, y otras. También maderables, como *Swietenia humilis*, *Tabebuia donell smithii* y otras; además de especies que sirven como fuente de materia prima para el control de plagas agrícolas, como es *Azdirachta indica* (árbol neem). Se recomienda en especial, a la especie pionera *M. calabura*, que se utiliza para restaurar áreas degradadas dentro de cárcavas, zonas de depósitos de azolves, o en cualquier área desprovista de vegetación.

Se eligieron especies nativas para reforestar por sus características biológicas, ecológicas y uso potencial, y para conservar la diversidad genética regional. La densidad de la plantación depende del tamaño del árbol, su costo y la función que tendrá, para una alta densidad o barrera viva, una reforestación en línea; para fruticultura, en tres bolillo.

La plantación se realiza al inicio de la temporada de lluvia, al mismo tiempo que la agricultura de temporal, por lo que la reforestación se desfasa, u ocurre tardíamente, por falta de mano de obra cuando más se necesita. Se recomienda plantar a principios de junio, y extenderse durante todo junio, julio y hasta principios de agosto, pero NO más tarde.

3.5.2 Recomendación para disminuir la carga de plaguicidas

Control de maleza: Con azadón o cultivadora durante la fase temprana de control mecánico. Al sembrar el maíz asociado con calabaza, esta última extiende sus hojas por el piso y suprime la maleza competidora del maíz.

Control de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*): Para controlar este gusano, se utiliza el extracto vegetal de hojas, tallos y semillas del árbol neem (*A. indica*), descrito por Mendoza et al. (2013), como sencillo y eficiente. Este extracto actúa como fungicida, insecticida, acaricida, nematocida y repelente. Se aplica en forma preventiva 20 días después de la siembra o cuando se detectan los primeros ataques. Otra forma de control es mediante: (1) Entomopatógenos, como son *Bacillus thuringensis*, el virus de *Poliedrosis nuclear*, el hongo *Nomuraea rileyi*, *Steinemema carpocapsae*, *Baculovirus* especializados para Lepidopteros, y otros; (2) Reguladores del crecimiento, como los tebufenocidos, metoxifenocidos, halofenocidos y cromafenosidos, que ya se adquieren en el comercio; (3) Especies parasitoides como *Telenomus sp.*, *Trichogramma sp.*, *Meteorus laphygamae*, *Chelonus insularis*, *Apanteles sp.*, *Eiphosoma sp.*, *Winthemia sp.*, *Sarcophaga sp.*, *Archytas sp.*; (4) Depredadores como *Celus sp.*, *Orios tristicolor*, *Cycloneda sanguinea*, *Hyppodamia convergens*, *Coleomeguilla maculata*, *Podicus sp.*, que se pueden adquirir en el mercado (García Nevárez et al, 2009), y *Palgus spinetoram* junto con gránulos fago-estimuladores (Spinosad) de harina, aceite y almidones de maíz (Williams

et al., 2004). Además de evitar la contaminación por plaguicidas, es importante conservar la fauna benéfica que muchas veces ya se encuentra en el campo, como es *Chrysoperla sp.*, *Hippodamia convergens*, *Coleomegilla maculata* y otros.

Control de gallina ciega (*Phyllophaga sp.*): Aplicando extracto de *Azadirachta indica*, y plantando *Tagetes erecta* (cempasúchil). Otra forma de disminuir significativamente la población de gallina ciega es a través de un barbecho profundo, siempre y cuando el área sea plana y el suelo profundo. Como enemigos naturales existe la mosca de la familia Pyrgotidae y las avispas de las familias de Scoliidae y Tiphiidae, ambas himenópteros.

Control de gusano de alambre (*Agriotes sp.*, coleoptera): con extracto de *A. indica* (Mendoza et al. 2013).

3.6 REFERENCIAS

- BOHOOL, B.B., J.K. LADHA, D.P. GARRITY Y T. GEORGE. 1992. Biological nitrogen fixation for sustainable agriculture: A perspective. *Plant and Soil* 141: 1-11.
- CANTERO, J.J., NUÑEZ, C., AMUCHÁSTEGUI, A. 2012. Capítulo 7: Control de erosión en áreas críticas. Técnicas de bioingeniería. En: *Erosión Hídrica. Principios y técnicas de manejo*. (Eds. CISNEROS, J., CHOLAKY, C.G., CANTERO GUTIERREZ., GONZALEZ, J.G., REYNERO, M.A., DIEZ, A., BERGESIO, L. Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina.
- COFEPRIS. 2009. *Catálogo de Plaguicidas*. http://www.cofepris.gob.mx/wb/cfp/catálogo_de_plaguicidas (Página visitada el 12-02-2011).
- DÍAZ G. G. 2013. *Trips: Otra plaga que ataca el maíz. Control de plagas*. UNISEM. Guanajuato, México.
- FAO-ISRIC-IUSS. 2007. *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación personal*.
- FIGUEROA, S. B., AMANTE O. A., CORTÉS T. H. G., PIMENTEL L. J., OSUNA C. E. S., RODRÍGUEZ O. J. M. Y MORALES F. F. J. 1991. *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. Colegio de Postgraduados CREZAS y Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México. 150 p.
- FIGUEROA S., AMANTO O., CORTES T., PIMENTEL L., OSUNA C., RODRÍGUEZ O., MORALES, F., 1991; *Manual de Predicción de Pérdidas de Suelos por Erosión*; Colegio de Postgraduados, Montecillos, Edo. México; SARH.
- FRINK, C.R., P.E. WAGGONER Y J.H. AUSUBEL. 1999. *Nitrogen fertilizer: retrospect and prospect*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96: 1175-1180.
- GAVI R. F. 2010. *Uso de fertilizantes. Edafología*. Colegio de Postgraduados. IRENAT. Montecillo, Edo México.
- GARCÍA NEVAREZ, TARANGO RIVERO, 2009; *Manejo Bioracional del gusano gogollero en maíz*; INIFAP, Folleto técnico No. 30, 2009; Campo experimental Delicias, Chihuahua
- INEGI. 1975. *Carta de uso del suelo Iguala E14A78*. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. 1976. *Carta edafológica Iguala E14A78*. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. 1977. *Carta de uso potencial Iguala E14A78*. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. 1998. *Carta topográfica Iguala E14A78*. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. 2007. *Conjunto de datos vectoriales carta topográfica E14A78 escala 1: 50 000*. Aguascalientes, Ags.

- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 2010. *La producción de maíz de Temporal en Guerrero*. Iguala, Guerrero; México.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. 2013. *Estudio para la Identificación de las Causas Niveles y Grado de Contaminación Ambiental en la Laguna de Tuxpan, Guerrero y Propuestas para el Tratamiento de las Aguas Residuales Descargadas en Ella y sus Afluentes*. IMTA-CAPASEG. Informe Final. Tomo I. Convenio CCE.01.04.3.0.2013.-0231. México.
- MADELEY J. 2003. *Paraquat, El controvertido herbicida de Syngenta*. Costa Rica.
- MENDOZA R., TEJADA E. 2013; *Control Biológico de plagas en el cultivo de maíz mediante el uso de Nim (Azadirachta indica), Cartillas de Buena Práctica; Serie Agrícola; FAO Bolivia; (www.fao.org/3/a-as975s.pdf)*
- MITASOVA H., BROWN W. M. Y JOHNSTON D.M. 2001. *Terrain Modelling and Soil Erosion Simulation-Final Report*. US Army Engineering Research and development Center (ERCD).
- PASOLAC. 2005. *Manejo de suelos y agua. Tecnologías y metodologías validadas para mejor la seguridad alimentaria en las zonas secas de Honduras*. FAO. INIA. Tejucigalpa, Honduras. 105 p.
- SCHIECHTL, STERN, 2001; *Naturnaher Wasserbau; Anleitung für Ingenieurbioologische Bauweisen*. Ernst & Sohn, Berlin.
- TARBOTON D. G. 1997. A New Method for the Determination of Flow Directions and Upslope Areas in Grid Digital Elevation Models. Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Logan, U.S.A. *Water Resources Research*, 33(2): 309-319. American Geophysical Union. USA.
- WILLIAMS I.R. 1975; *Sediment Yield Prediction with Universal Equation using Runoff- Energy- Factor*. United States Department of Agriculture; Agricultural Research Service S-40, pp 244-252.
- WILLIAMS, CISNEROS, PENAGOS, VALLE, TAMEZ. 2004. Ultralow rates of spinosad in phagostimulant geanules provide control of Spodoptera frugiperda (Lepidoptera: Noctuidae) in maize. *J. Econ. Entomol.* 97(2):422-428
- YOUNG, A. 1989. *Agroforestry for Soil Conservation*. CAB International, Sallingford/ Oxford, UK.
- ZEVENBERGEN, L. W. y C. R. Thorne. 1987. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 12. Pp. 12-56.
- BONILLA G. E. – UAM. 2010. Insecticida de uso en jardinería puede causar esterilidad: expertos. *La Jornada, Ciencias*.



Limnología del río “El Tomatal”

EDITORES:

Rebeca González Villela.

Ana Cecilia Tomasini Ortíz.

Jorge Izurieta Dávila.

CONTENIDO

Capítulo 4

4.1 INTRODUCCIÓN	142
4.2 AREA DE ESTUDIO	146
4.3 MÉTODOS	147
4.4 RESULTADOS	150
4.5 DISCUSIÓN	165
4.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	169
4.7 REFERENCIAS	170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.2.1. Ubicación del río El Tomatal, Gro., en el área de estudio.	146
Figura 4.3.1. Puntos de muestreo de físicoquímicos del canal y el río El Tomatal.	149
Figura 4.4.1. Niveles del agua a nivel de máxima ribera para diferentes caudales en las 5 secciones del canal artificial del río El Tomatal al lago (modificada de IMTA 2013).	151
Figura 4.4.2. Topografía y simulación del nivel de la superficie libre del agua en río Tomatal que va al lago (modificada de IMTA 2013).	151
Figura 4.4.3. Batimetría en los puntos de muestreo del río Tomatal (modificada de IMTA 2013).	153
Figura 4.4.4. Comportamiento del caudal, temperatura, ph, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales (SST) y conductividad en el río El Tomatal (límite máximo permisible para el río en raya continua, y para descarga en discontinua; modificada de IMTA 2013).	159
Figura 4.4.5. Comportamiento de la temperatura, ph, caudal, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales (SST), conductividad en el río El Tomatal y metales pesados (LMP para el río en raya continua, y para descarga en discontinua; modificada de IMTA 2013).	161

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 4.3.1. Ubicación de puntos de muestreo de topográficos, batimetría y calidad del agua del canal y río El Tomatal (modificada de IMTA 2013).	148
Cuadro 4.4.1. Características topográficas y batimétricas de las cinco secciones del canal artificial río El Tomatal - Laguna de Tuxpan (modificada de IMTA 2013).	150
Cuadro 4.4.2. Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo en el río El Tomatal (modificada de IMTA 2013).	153
Cuadro 4.4.3. Producción de agua y de sedimentos de la subcuenca del río El Tomatal (modificada de IMTA 2013).	154

4.1 INTRODUCCIÓN

Acorde con el Inventario Nacional de la Calidad del Agua de los USA, los ríos y los lagos de su territorio soportan múltiples usos que incluyen el suministro de agua para consumo humano, la pesca, la recreación, la agricultura, así como la prevención y control de la corriente y la erosión. Con el tiempo, los efectos acumulativos de los cambios en el entorno resultan en variaciones significativas en los ríos, los corredores fluviales, los lagos y los ecosistemas asociados, que se manifiestan en la degradación de la calidad del agua, en el decremento en la capacidad de almacenamiento, en la pérdida de hábitats para los peces y la vida silvestre, y en el deterioro de su valor recreacional y estético, siendo las causas más significativas de la degradación del hábitat para la vida silvestre la sedimentación y el exceso de nutrientes, que afectan al 35% de los ríos y al 45% de los lagos evaluados (https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2000_06_30_305b_98report_98summary.pdf; Brown y King 2003 a, b y c).

Los corredores fluviales son sistemas complejos que incluyen gran variedad de suelos, plantas, animales y sistemas de corrientes que en los ríos efectúan muchos procesos ecológicos, que van desde la modulación del flujo de la corriente, el almacenamiento de agua, la remoción de nutrientes y metales pesados y proveen el hábitat para gran cantidad de plantas y animales acuáticos y terrestres (Arthington 1998).

Los ríos, los lagos y sus riberas, responden en forma conjunta a los cambios del entorno mediante variaciones en sus procesos físicos, químicos y biológicos. Están influenciados por la alteración del flujo de agua, el movimiento de sedimentos, los cambios de temperatura y otras variables que en conjunto se encuentran en “equilibrio dinámico”. Cuando los cambios en el medio van más allá de los rangos naturales usuales, el balance dinámico se pierde, dando lugar a un ajuste en el ecosistema que puede no ser favorable a las necesidades sociales (Arthington y Lloyd 1998; Bayley 1995; King et al. 2003).

La regulación de los ríos mediante represamientos es una causa potencial de alteración del ecosistema. La degradación de la calidad del agua en un río puede tener efectos negativos en el lago asociado. El comportamiento estacional del caudal del río influye en la profundidad del lago, en su estratificación térmica y en la distribución de nutrientes en el volumen de agua (Lewis 2000).

Actualmente, el ambiente es clave para el manejo sostenible del agua. Representa un tipo de usuario y en muchos aspectos, es la parte central del manejo de los recursos acuáticos, puntos que se consideran críticos para una gestión que procure el desarrollo y salud de las poblaciones, de la productividad agrícola, industrial y energética, y la reducción de la pobreza para el desarrollo sostenible de las comunidades aledañas a los ríos y lagos. Las estrategias ambientales deben de enlazar y balancear los intereses entre el manejo sostenible del recurso acuático, la sustentabilidad ambiental y la pobreza (Lytle y Poof 2004; Tharme 2003).

La contaminación del agua rompe la armonía entre el hombre y su medio, tanto a corto como a mediano y largo plazo, por lo que actualmente la prevención y la lucha contra esta son prioritarias. Según la Ley de Aguas Nacionales, la contaminación es la acción y el efecto de introducir materias o energía, o inducir condiciones en el agua, que de modo directo o indirecto impliquen una alteración perjudicial en su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica (Muñoz 2008). Entre los factores que contaminan pueden mencionarse a: la población, los procesos industriales, los satisfactores, los elementos de consumo a gran escala, el vertido de desechos a ríos, lagunas, esteros y litorales (Vázquez 2013).

El agua residual (AR) del drenaje doméstico es el abastecimiento desechado, después de ser usado por la comunidad. Es indispensable conocer la fuente y los variados solutos agregados al AR procedente de cocinas, pisos, baños, lavabos, regaderas, sanitarios y lavanderías (jabón, suciedad, materias fecales, papel, restos de alimentos, etc.), que gradualmente la van coloreando de gris a negro e infiriéndole un olor desagradable. La mayoría del residuo es orgánico y propicio para los saprobiontes, (organismos descomponedores). Las aguas negras son líquidas de composición variada y compleja, procedente de los diferentes usos domésticos, comerciales, públicos e industriales mezcladas o no con agua de lluvia.

Las AR industriales son los efluentes de los diferentes procesos fabriles y usos propios de la producción en gran escala. Varían en su composición de acuerdo con los procesos en los que participan (Vázquez 2013). Algunas son enjuague relativamente limpio, otras surgen fuertemente cargadas de materia orgánica o mineral, o con sustancias corrosivas, tóxicas, inflamables o explosivas según sea su origen. Las aguas de retorno agrícola (ARA), generadas en la producción agropecuaria, incluyen desechos animales y vegetales. Las AR municipales proceden de un servicio de alcantarillado sanitario combinado. Al escurrir la lluvia por laderas, caminos y campos de cultivo, arrastra materia orgánica (MO) y química de los drenajes de las ciudades y de los suelos rurales.

Las AR crudas son las que no han recibido ningún tratamiento. Las AR frescas son las aguas residuales en las que aún se conservan una porción de oxígeno libre. Las AR sépticas son aquellas que han agotado el oxígeno libre y todo el contenido de MO se encuentra en putrefacción.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), ha establecido como un derecho humano fundamental el disfrute del grado máximo de salud posible. Considera la salud como un estado complejo de bienestar físico, mental y social, y fija el nivel de salud por el grado de armonía que exista entre el hombre y el medio que sirve de escenario a su vida (Muñoz 2008). Por este motivo, los EUA, la ONU, así como la mayoría de los países, disponen de sus propios estándares de calidad para el agua potable. Un gran número de países disponen de estándares de uso para la pesca y la natación. En el caso particular de los EUA, la United States Environmental Protection Agency (USEPA), tiene como objetivo que sus aguas sean aptas para la pesca, la natación y usos recreativos, aunque Russell (2013), señala aún no se ha logrado.

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las AR de las descargas hacia aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta norma no se aplica a las descargas provenientes de drenajes de aguas pluviales.

Esta NOM específica que la concentración de contaminantes básicos, metales pesados y cianuros para las descargas de AR a aguas y bienes nacionales, no debe

exceder el valor indicado como límite máximo permisible. Para el potencial de hidrógeno (pH), se establece el rango entre 5 a 10 unidades. Señala que para determinar la contaminación por patógenos se tomará como indicador a los coliformes fecales, donde el límite máximo permisible para las descargas de AR vertidas a aguas y bienes nacionales, así como las descargas vertidas al suelo (uso en riego agrícola) es de 1,000 y 2,000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 mL para el promedio mensual y diario, respectivamente.

El indicador en la NMX de contaminación por parásitos, son los huevos de helminto, cuyo límite máximo permisible para las descargas vertidas al suelo (uso en riego agrícola), es de un huevo por litro para riego no restringido, y de cinco huevos por litro para riego restringido.

En el caso de la laguna de Tuxpan, la desviación del cauce del río El Tomatal generó el transporte de sedimentos que se vierten directamente a esta, abatiendo su profundidad y modificando las condiciones fisicoquímicas del agua y del hábitat para las especies animales. Por lo tanto, se requiere evaluar los caudales del río y su aporte de contaminantes, nutrientes, sólidos suspendidos totales y de las especies invasoras para evaluar la calidad del agua y sus condiciones ecológicas, la longevidad del lago y, en consecuencia, para generar las estrategias para su manejo, conservación y recuperación.

4.2 AREA DE ESTUDIO

Las corrientes superficiales presentes en las subcuencas del río El Tomatal y Laguna de Tuxpan son: el río San Juan, con caudales permanentes, y el río El Tomatal. También presenta arroyos temporales como el Ceja Blanca, Las Tijerillas y el Naranjo. El Tomatal es un afluente artificial, cuyo cauce fue modificado en los 40's para derivar sus aguas hacia la Laguna de Tuxpan. Sus coordenadas geográficas son 18° 21' 31.02" N y 99° 29' 57.14" O (Figura 4.2.1). El área de su cuenca es de 21.5 km², con un gasto de diseño de 76 m³/s para un periodo de retorno de 100 años (Moreno et al. 2006). Pertenece al municipio de Iguala de la Independencia y se ubica hacia el este de la ciudad, en la salida hacia Acapulco (Figura 4.2.1). El río surge de la presa de Tepecoacuilco y atraviesa la barranca de El Tomatal. La desviación de la corriente de la presa Valerio Trujano y del río San Juan, así como del Tomatal, conducen hacia el lago los sedimentos producidos por la erosión de la cuenca. Las actividades económicas de la población propician mayor contaminación (desechos agropecuarios, domésticos, industriales y turísticos), y abaten la profundidad del lago, originando variaciones en las condiciones fisicoquímicas del agua y las condiciones ambientales para las especies acuáticas.



Figura 4.2.1. Ubicación del río El Tomatal, Gro., en el área de estudio.

4.3 MÉTODOS

Se obtuvieron los perfiles topobatimétricos en siete sitios del El Tomatal y cinco en el canal artificial (tramo de 1.3 km entre la desviación de El Tomatal y el lago). El levantamiento de las cinco secciones (1,176.33, 902.17, 602.05, 302.10 y 0.00 m), se realizó para simular los niveles del agua a máxima rivera de un tramo de 1,176 m, iniciando a una altura de 761.09 msnm y terminando en 757.56 msnm, lo que equivale a una variación de 5.53 m entre el punto más alto y el más bajo. La simulación del caudal para este tramo se obtuvo aplicando el programa HEC RAS, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del US Army Corps of Engineers. La Versión 4.0, permite efectuar cálculos hidráulicos unidimensionales para una red completa de canales naturales y artificiales. El cálculo se basa en la solución de la ecuación de energía en una dimensión. Las pérdidas de energía son evaluadas por fricción (ecuación de Manning) y por contracciones/expansiones (coeficiente multiplicado por el cambio en la carga de velocidad). El esquema de solución es una adaptación del modelo UNET (Barkau 1992 y HEC 1997). La velocidad de la corriente (m^3/s), se efectuó con un equipo electromagnético Flow Mate modelo 2000, mediante vadeo en el cauce en las mismas cinco secciones del tramo correspondiente al canal artificial (Cuadro 4.3.1 y Figura 4.3.1).

Los aforos en El Tomatal se efectuaron con el método de área de la sección por la velocidad del agua, determinada con un flujómetro marca Marsh-Mc-Birney FlowMate. Para analizar la calidad del agua se localizaron las descargas puntuales provenientes del Rancho del Cura, el poblado El Tomatal y el poblado de Tuxpan, determinando sus coordenadas geográficas con un geoposicionador satelital (GPS), marca GARMIN modelo 78s. Otros tres puntos de descargas de AR del poblado que son vertidas hacia el río. Otros cuatro puntos sobre el cauce del río, dos de ellos antes de las descargas, uno después de ellas y otro punto antes de llegar al lago acorde a la metodología descrita en la NOM-001-SEMARNAT-1996

(un muestreo simple para verificar las cargas orgánicas y otro muestreo compuesto de 24 horas). La calidad del agua se determinó mediante la materia flotante (presencia/ausencia), temperatura (°C), pH, conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y potencial de óxido-reducción (mV) con una Multi-Sonda portátil marca “YSI 556 MPS.

Los sólidos sedimentables y suspendidos totales, las grasas, aceites, nitrógeno total Kjeldahl, fósforo total, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos y sales disueltas, los metales cadmio, cobre, cromo hexavalente, cianuros, mercurio, arsénico, níquel, plomo y zinc (todos en mg/L), coliformes totales y fecales (*Escherichia coli*) (NMP/100), se evaluaron siguiendo los parámetros e indicadores de calidad listados en la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997, adicionando la demanda química de oxígeno (DQO) establecida por la Ley Federal de Derechos en su artículo 278-B y de acuerdo a la NMX-AA-003-1980 de Aguas residuales – muestreo. Los puntos seleccionados, así como su ubicación geográfica, se enlistan en la Cuadro 4.3.1 y Figura 4.3.1.

Cuadro 4.3.1. Ubicación de puntos de muestreo de topográficos, batimetría y calidad del agua del canal y río El Tomatal (modificada de IMTA 2013).

Identificación	Coordenadas Geográficas		Altitud (m)
	Latitud N	Longitud O	
Canal 0 (C-0)	18° 21' 23.4"	99° 30' 00.1"	757.6
Canal 1 (C-1)	18° 21' 15.9"	99° 30' 03.6"	758.0
Canal 2 (C-2)	18° 21' 06.1"	99° 30' 09.6"	758.7
Canal 3 (C-3)	18° 20' 57.4"	99° 30' 14.0"	759.8
Canal 4 (C-4)	18° 21' 02.8"	99° 30' 50.8"	761.1
Río Tomatal 1 (R-1)	18°19'12.6"	99°29' 20.5"	798.0

Río Tomatal 2 (R-2)	18°19'17.9"	99°29' 24.7"	785.0
Descarga 1 Río Tomatal (D-1)	18°19'24.0"	99°29' 24.5"	784.0
Descarga 2 Río Tomatal (D-2)	18°19'16.4"	99°29' 37.9"	797.0
Descarga 3 Río Tomatal (D-3)	18°19'16.4"	99°29' 48.0"	804.0
Río Tomatal 3 (R -3)	18°19'46.1"	99°29' 39.5"	780.0
Río Tomatal 4 (R-4)	18°20'28.0"	99°30' 24.8"	767.0

Fuente: Modificada de IMTA 2013

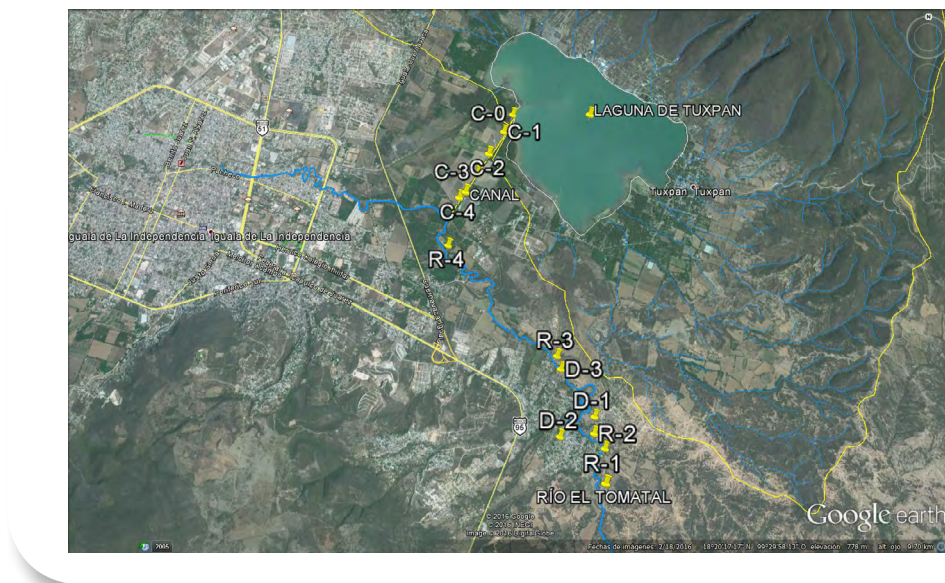


Figura 4.3.1. Puntos de muestreo de físicoquímicos del canal y el río El Tomatal.

4.4 RESULTADOS

Se determinó la planicie de inundación y el nivel de la superficie libre del agua a máxima ribera en cada sección transversal en el tramo del cauce. En el Cuadro 4.4.1 y Figura 4.4.1, se muestran las características topográficas y batimétricas del canal artificial que va del El Tomatal al lago, junto con la ubicación de las secciones y la pendiente entre cada una de ellas.

Cuadro 4.4.1. Características topográficas y batimétricas de las cinco secciones del canal artificial río El Tomatal - Laguna de Tuxpan (modificada de IMTA 2013)

Sección	Ancho (m)	Profundidad (m)	Caudal a Nivel de Ribera Máxima. (m ³ /s)	Pendiente
1 Canal 1+176.33 (C-4)	7.0	2.0	11.0	0.00467
2 Canal 0+902.17 (C-3)	9.0	2.0	11.0	0.00397
3 Canal 0+602.85 (C-2)	12.75	2.9	+ 20.0	0.00207
4 Canal 0+302.1 (C-1)	11.75	2.5	20.0	0.00146
5 Canal 0+000 (C-0)	9.5	2.0	11.0	
Promedio	10.0	2.28	13.25	0.003044

Fuente: Modificada de IMTA 2013

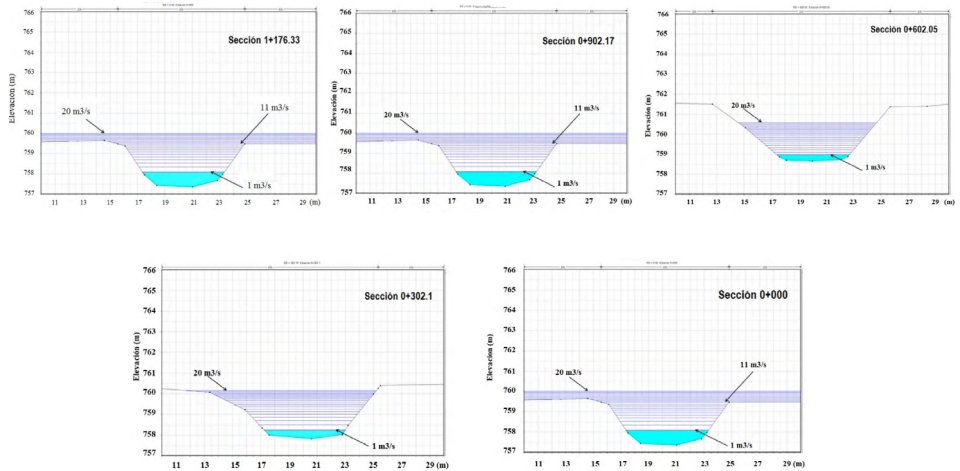


Figura 4.4.1. Niveles del agua a nivel de máxima ribera para diferentes caudales en las 5 secciones del canal artificial del El Tomatal al lago (modificada de IMTA 2013).

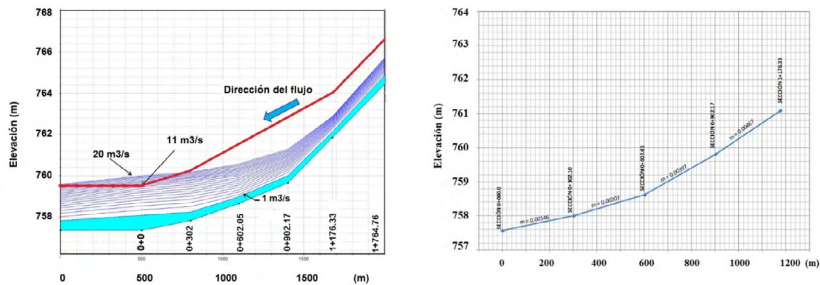


Figura 4.4.2. Topografía y simulación del nivel de la superficie libre del agua en río Tomatal que va al lago (modificada de IMTA 2013).

Se simuló el flujo permanente, además de calcular los niveles de agua en cada sección. Este componente del modelaje del sistema se realizó con los perfiles de la superficie del agua para un flujo gradualmente variado. La simulación en el modelo HEC-RAS generó 20 perfiles o caudales con el nivel de máxima riberera del cauce por cada sección. Los caudales de entrada fueron aumentando desde 1 m³/s hasta 20 m³/s. La Figura 4.4.2 ilustra el nivel del agua en cada sección para los diferentes caudales. En la sección 1+176.33 se muestra que el nivel de riberera máxima corresponde a un caudal de 11.0 m³/s, con un ancho máximo de 7.0 m y 2.0 m de profundidad. En la sección 0+902.17, el caudal máximo a nivel de riberera máxima es 11.0 m³/s, con un ancho máximo de 9.0 m y 2.0 m de profundidad. La sección 0+602.05 señala un caudal mayor a 20.0 m³/s para llegar a nivel de riberera máxima, con un ancho de 12.75 m y una profundidad de 2.9 m. Para la sección 0+302.10 el caudal a riberera máxima es de 20.0 m³/s, con un ancho de 11.75 m y una profundidad de 2.5 m. La sección 0+000.00 con caudal máximo de 11.0 m³/s para llegar a la riberera máxima, con un ancho de 9.5 m y 2.0 de profundidad.

El nivel máximo de la sección 0+000, con un caudal de 11 m³/s, se ve rebasado en julio en algunos tramos del río, porque el agua supera el caudal de riberera máxima inundando las zonas aledañas. En este mes, el promedio de caudal calculado está en los 13.37 m³/s.

La batimetría de los siete puntos en la parte del río El Tomatal señala un ancho promedio de 3.75 m, una profundidad de 0.45 m y un caudal promedio de 29.72 m³/s. Los perfiles batimétricos de las secciones transversales se observan en la Figura 4.4.3.

La población no tiene drenaje. Descarga sus efluentes domésticos de AR directamente a las calles y avenidas mediante tubos, y la fuerza de gravedad los dirige hacia las barrancas, que sirven de sistema colector de los efluentes generados en las casas habitación que están edificadas en los alrededores del río (Cuadro 4.4.2).

Cuadro 4.4.2. Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo en el río El Tomatal (modificada de IMTA 2013)

Identificación	Altitud (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Gasto (L/s)
Río Tomatal 1	798	3.10	0.65	230
Río Tomatal 2	785	4.20	0.30	280
Río Tomatal 3	780	3.80	0.40	318
Río Tomatal 4	767	6.20	0.44	361
PROMEDIO		3.75	0.419 a	297.25

Fuente: Modificada de IMTA 2013

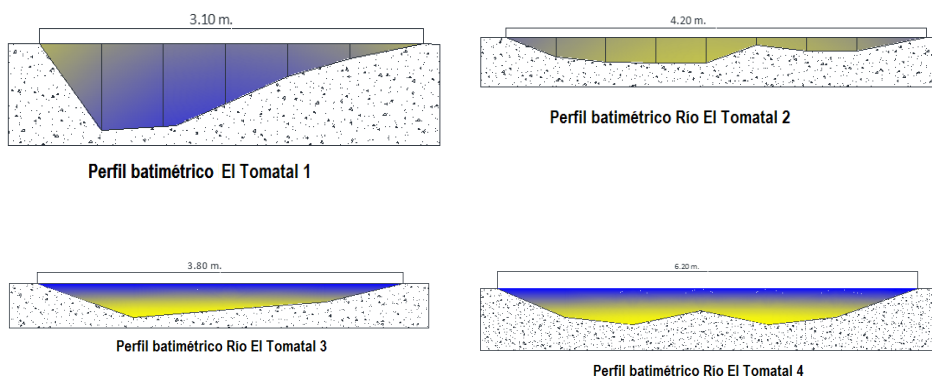


Figura 4.4.3. Batimetría en los puntos de muestreo del río Tomatal (modificada de IMTA 2013).

También se observó el arrastre de sedimentos del fondo del río, que al estar constituidos principalmente por limo, generan la apariencia marrón del agua que fluye por el cauce.

Vida media de la Laguna de Tuxpan

Los estudios de erosión, efectuados en la subcuenca del río El Tomatal, de sedimentación y batimetría de la Laguna de Tuxpan, señalan que el volumen de agua del lago es de 18'895,563 m³, resultado de una precipitación promedio anual de 24'494,400 m³. La producción de agua de la subcuenca del Tomatal para un caudal máximo promedio anual del río es de 1'058,900 m³, el aporte de sedimentos promedio anual de 7.453 t ha⁻¹ y de 18,700 t año⁻¹ (Cuadro 4.4.3).

Cuadro 4.4.3. Producción de agua y de sedimentos de la subcuenca del río Tomatal (modificada de IMTA 2013)

Mes	Precipitación (mm)	Q max. Prom. Anual (miles de m ³ /s)	Q máximo (m ³ /s)	Sedimentos		Volumen precipitado (miles de m ³)
				(t/ha)	(miles de t)	
Ene	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
Feb	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
Mar	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
Abr	4.00	0.00	0.00	0.000	0.00	100.23
May	40.00	0.00	0.00	0.000	0.00	1,002.33
Jun	101.00	88.65	11.24	0.599	1.50	2,530.88
Jul	319.00	414.35	25.37	2.944	7.38	7,993.57
Ago	125.50	184.18	17.78	1.282	3.21	3,144.80
Sep	192.00	173.47	11.24	1.146	2.87	4,811.17
Oct	123.00	198.28	25.37	1.482	3.71	3,082.16
Nov	73.00	0.00	0.00	0.000	0.00	1,829.25
Dic	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
Suma	977.5	1,058.9		7.453	18.7	24,494.4

Modificada de IMTA 2013

Considerando estos factores para el cálculo del volumen de sedimentos que transporta el río Tomatal, se tiene que:

Volumen de sedimentos

$$V_s = R * A_c * 1000 / W_t$$

En donde

R = producción de sedimentos en ton/km²

A_c = área de la cuenca en km²

W_t = peso específico o densidad aparente de los sedimentos

Para la cuenca de la Laguna de Tuxpan se tiene:

R = 3,307 ton/km²

A_c = 65.49 km²

W_t = 1,460 kg/m³

De esta manera el volumen de sedimentos es:

$$V_s = 3,307 * 65.49 * 1000 / 1,460 = 148,339.3 \text{ m}^3$$

De los resultados de la topobatimetría, con el nivel del agua a una altitud de 749.57 msnm, se tiene que el volumen de la Laguna de Tuxpan es de:

$$V_{\text{TUXPAN}} = 18'895,563 \text{ m}^3$$

El tiempo en años que se requiere para llenar el volumen del lago con sedimentos a la tasa de aportación calculada sin considerar todas las microcuencas de la Laguna de Tuxpan, es:

$$T = 18'895,563 / 148,339.3 = 127 \text{ años}$$

Si se considera la aportación de sedimentos a la Laguna de Tuxpan de todas las microcuencas, y se excluye su pérdida por los volúmenes que se derivan por el canal de salida, del total de los sedimentos que entran anualmente al lago, es decir 49,411 toneladas, el 37.8% corresponde a la micro cuenca del río El Tomatal.

Tiempo de residencia de la Laguna de Tuxpan:

Para calcular el tiempo de residencia del agua en la Laguna de Tuxpan, se divide su volumen entre el volumen anual de los escurrimientos que ingresan por el río Tomatal, en este caso,

$$\begin{aligned} V_{\text{Tuxpan}} &= 18,895,563 \text{ m}^3 & T_r &= 18'895,563 / 1'058,900 = 17.8 \text{ años} \\ V_{\text{ESCURRIDO}} &= 1,058,900 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Si se considera la aportación anual de todas las micro cuencas, 2,676,530 m³ (incluyendo El Tomatal), el tiempo de residencia es de:

$$T_r = 18'895,563 / 2'676,530 = 6.8 \text{ años}$$

Calidad del agua del Río El Tomatal:

Las Figuras 4.4.4 y 4.4.5, muestran los promedios de los parámetros de campo medidos durante el muestreo con el fin de caracterizar las descargas de AR y del cauce del río. En las figuras se señalan los límites máximos permisibles (LMP) estipulados por la NOM-001-SEMAR NAT-1997 y los LMP para DQO estipulados por la Ley Federal de Derechos, para un cuerpo receptor Tipo C, protección a la vida acuática.

En el punto R-1, la temperatura del agua promedió 26.6°C ± 2.55, el pH 7.98 ± 0.12, ligeramente alcalino, y la conductividad 203.5 µS/cm ± 9.14, re-

lativamente baja. Estos parámetros presentaron valores constantes, sin variación significativa durante el día (Figura 4.4.4). El punto R-2 se encuentra a 250 m del R-1 aguas abajo, se caracteriza por que no hay viviendas con descargas hacia la calle. Su temperatura promedió $26.77^{\circ}\text{C} \pm 2.5$, el pH 7.94 ± 0.13 , ligeramente alcalino, y la conductividad $202.5 \mu\text{S}/\text{cm} \pm 10.37$, relativamente baja. El punto R-3 se encuentra en la salida de la comunidad de “El Tomatal”, sobre el cauce. En este tramo confluyen las tres descargas de AR puntuales detectadas, y otras posibles descargas de contaminación difusa. Su temperatura fue de $27.5^{\circ}\text{C} \pm 2.65$, el pH de 7.99 ± 0.16 , ligeramente alcalino. Sin embargo, la conductividad de $222.25 \mu\text{S}/\text{cm} \pm 8.61$, relativamente baja, señala un ligero incremento en la concentración de sales causado por las descargas de AR pero sin impactar al río. El punto R-4 se localiza en la proximidad del lago, después de este punto no existen comunidades o viviendas que pudiesen impactar al río, sólo se encuentran tres posibles descargas de AR de menor magnitud: el Centro de Readaptación Social, una pequeña comunidad y un hotel. Su temperatura promedió $26.52^{\circ}\text{C} \pm 2.42$, el pH 7.94 ± 0.11 , ligeramente alcalino, y la conductividad $252 \mu\text{S}/\text{cm} \pm 6.39$, relativamente baja. En este punto, el caudal promedio fue de $230 \text{ L}/\text{s} \pm 11.3$. La concentración de grasas y aceites $<2.73 \text{ mg}/\text{L}$ fue baja y sin variación durante el día.

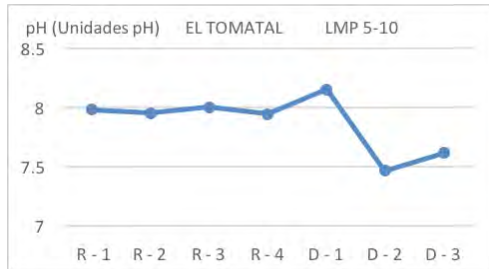
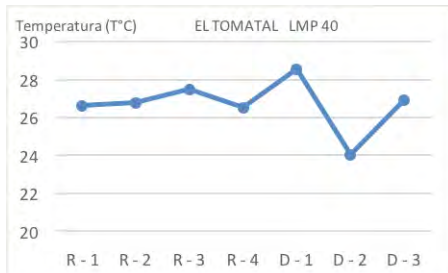
Los microorganismos coliformes fecales y totales estuvieron presentes con un promedio diario de $1.4 \times 10^3 \text{ NMP}/100 \text{ mL}$, alcanzando su mayor concentración a las 8:00 am, con $4.3 \times 10^3 \text{ NMP}/100\text{mL}$. En general, la mayor abundancia se presentó entre las 8:00 am y las 14:00 pm. No se encontraron huevos de helmintos.

Los sólidos suspendidos totales superaron el límite fijado en la NOM-001-semarnat-1996 para un cuerpo receptor tipo C, que se explica por el arrastre en el escurrimiento generado por la lluvia. Así, los SST son de origen principalmente natural (limo fino sin estratificación), puesto que no hay descargas de AR municipal en esta zona. Es el único parámetro que no cumple con la norma, puesto que los metales pesados no se presentaron en concentraciones mayores a los límites de detección de la técnica (Figura 4.4.4).

La materia orgánica, medida como DBO y DQO, fue de $2.5 \text{ mg O}_2/\text{L}$ y $31.3 \text{ mg O}_2/\text{L}$ respectivamente. La concentración de nitrógeno total fue de $2.6 \text{ mg}/\text{L}$,

en su mayor parte como nitrógeno orgánico (NTK), lo que es típico de un río. La concentración de nitritos y nitratos fue baja (0.57 mg/L) lo que indica la posible presencia de productos agroquímicos en el agua. La concentración de fósforo total fue <0.36 mg/L. Estos parámetros indican que la concentración de materia orgánica y nutrientes es baja y no causa afectaciones a la flora y fauna en este punto. En ningún caso se observó materia flotante. Acorde al índice de calidad emitido por la Comisión Nacional del Agua para aguas superficiales, la calidad en este punto es “EXCELENTE” respecto a la DBO. Sin embargo, la calidad se considera “ACEPTABLE” para la DQO, es decir, que el río tiene capacidad de autodepuración. Considerando a los SST, la calidad es catalogada como “CONTAMINADA”.

El punto de muestreo R-2, se seleccionó como control debido a que en los alrededores no existen descargas (Figura 4.4.4). Su temperatura promedió $26.77^{\circ}\text{C} \pm 2.5$, el pH 7.94 ± 0.13 , la conductividad de $202.5 \mu\text{S}/\text{cm} \pm 10.37$ fue baja. Las grasas y aceites con 12.46 mg/L, fueron más altos que en R-1, debido a que las viviendas de la ribera envían descargas difusas de agua jabonosa al río. La concentración promedio de sólidos suspendidos totales fue de 132 mg/L, valor por fuera de la norma y del índice de calidad del agua, atribuible al arrastre generado por las lluvias. No se observó materia flotante. La mayor densidad de coliformes fecales se presentó a las 11:20 am con 2.4×10^3 NMP/100 mL. La media diaria fue de 4.1×10^3 NMP/100 mL. Los coliformes totales presentaron un promedio de 2.6×10^4 NMP/100mL. No se encontraron huevos de helmintos.



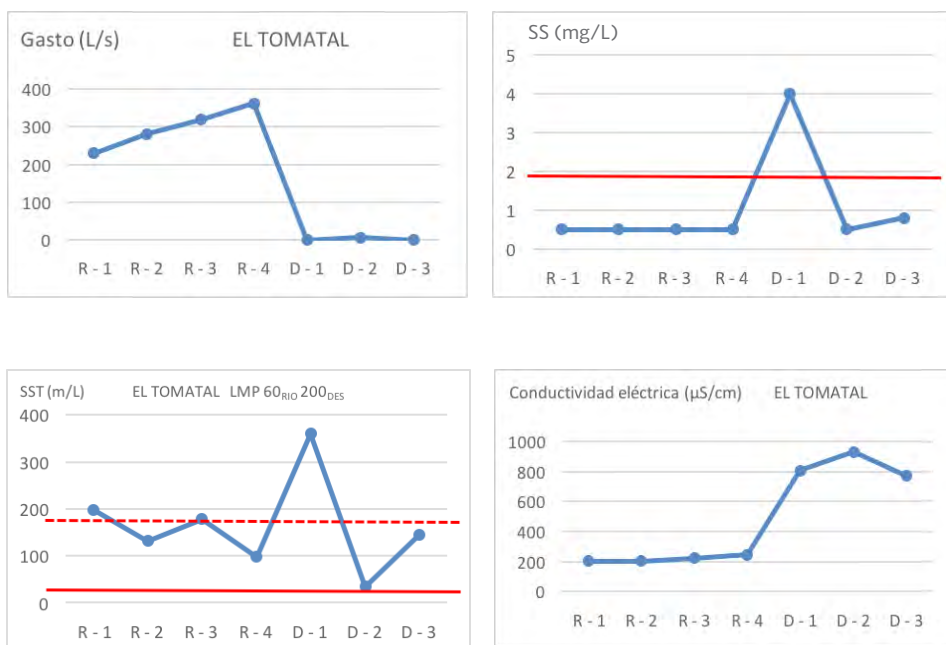
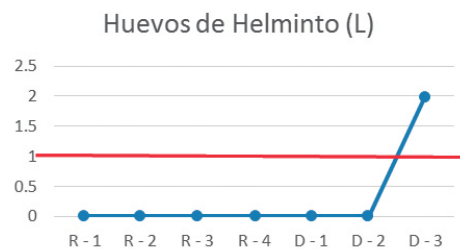
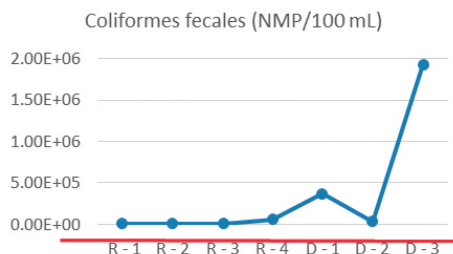
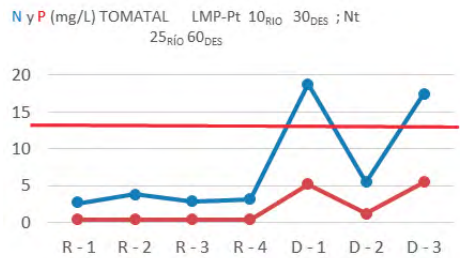
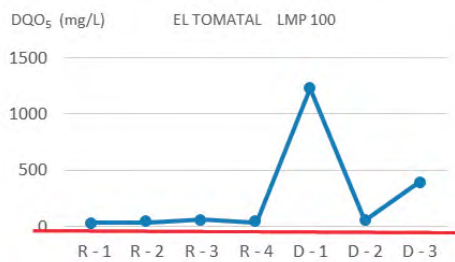
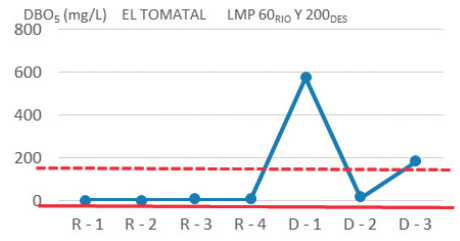
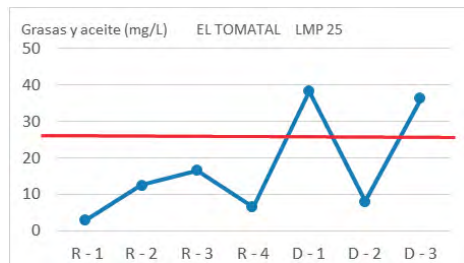


Figura 4.4.4. Comportamiento del caudal, temperatura, ph, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales (sst) y conductividad en el río el tomatal (límite máximo permisible para el río en raya continua, y para descarga en discontinua; modificada de IMTA 2013).

Los SST y coliformes fecales son los únicos parámetros que no cumplen con la norma. El exceso de sólidos suspendidos, se explica por su probable arrastre en los escurrimientos generados por las lluvias, mientras que la presencia de coliformes se debe a la descarga de AR gris y/o al ingreso de heces fecales de mamíferos al cuerpo receptor, inclusive cuando el caudal es excesivo, situación que indica que el río no tiene la capacidad para diluir este contaminante para alcanzar la densidad dentro de la norma, lo que se traduce en una señal de alerta para la época seca, cuando la capacidad de dilución y autodepuración se ve reducida. Acorde con el índice de calidad para aguas superficiales emitido por la Comisión Nacional del Agua, respecto a la DBO la calidad del río en este punto es “EXCELENTE”. Para DQO y SST, se considera como “ACEPTABLE”, es decir que tiene capacidad de

autodepuración. En términos generales, en este tramo el río se encuentra entre los límites máximos permisibles de “ACEPTABLE”.



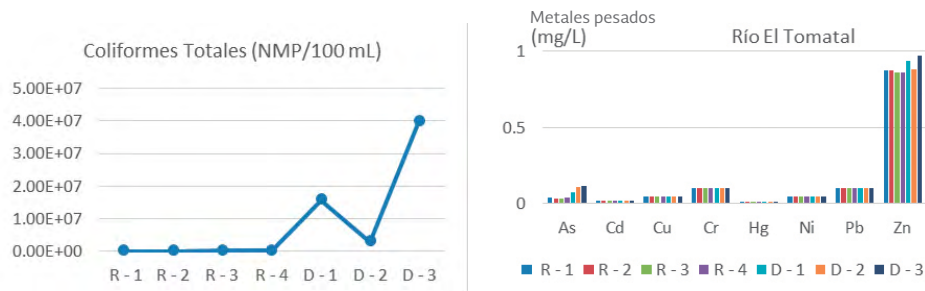


Figura 4.4.5. Comportamiento de grasas y aceites, DBO, DQO, nitrógeno, fósforo, coliformes fecales, huevos de Helminths, coliformes totales y metales pesados (Imp para el río en raya continua, y para descarga en discontinua; modificada de IMTA 2013).

El caudal promedio fue de 280 ± 22 L/s. Se observó que la densidad de coliformes fecales es ligeramente baja respecto al primer punto, y no impacta al río debido a: 1) la poca cantidad de viviendas en las márgenes, 2) la mayoría cuenta con fosa séptica, y/o, 3) la presencia de cloro en las aguas jabonosas y desinfectante que abate a las coliformes fecales.

La materia orgánica como DBO fue baja con un promedio de 2.27 mg O_2 /L. En contraste la DQO presentó un valor de 34.4 mg O_2 /L. El nitrógeno total promedió 3.8 mg/L, el de nitritos y nitratos fue bajo, con 0.53 mg/L, así como el de fósforo total, con 0.36 mg/L. Estos valores indican que la concentración de materia orgánica y nutrientes no causa afectaciones en la flora y fauna del río. No se detectaron metales pesados en concentraciones mayores a los límites de detección del método de cuantificación.

El tramo del río hasta el punto R-3, recorre toda la comunidad del “Tomatal”. El caudal promedio fue de 318 L/s ± 15 . A este tramo confluyen las tres descargas de aguas residuales puntuales detectadas y otras posibles descargas de contaminación difusa. La temperatura presentó un promedio de $27.5^\circ\text{C} \pm 2.65$, el pH de 7.99 ± 0.16 unidades, fue ligeramente alcalino. La conductividad, 222.25 $\mu\text{S}/\text{cm} \pm 8.61$, fue baja, revelando un pequeño ingreso de sales por las descargas de AR que no impacta al río.

Los sólidos suspendidos totales con 178 mg/L, cumplen para un río tipo A de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996, pero no para un cuerpo receptor tipo C, como es la laguna de Tuxpan. No hay presencia de materia flotante. Debido a las descargas de AR que ingresan al río desde la comunidad El Tomatal, la DBO aumentó a 3.9 mg O₂/L y la DQO a 62.6 mg O₂/L. El nitrógeno total presentó 2.82 mg/L y el fósforo total 0.36 mg/L. Estos valores indican un ligero aumento de materia orgánica y un bajo contenido de nutrientes. Los metales pesados no rebasaron los límites de detección. Las grasas y aceites promediaron 16.47 mg/L, con el máximo de 56.8 mg/L a las 15:40 hr. Se observó un aumento en la densidad de coliformes fecales respecto a R-1, de 1.4 x 10³ NMP/100 mL, a 4.6 x 10⁴ NMP/100 mL. La presencia de estos microorganismos indica descargas de AR gris y aportes de numerosas fuentes difusas (excremento de ganado y animales domésticos). La mayor densidad de coliformes fecales y totales se registró entre la mañana y el medio día, pero tampoco se encontraron huevos de helmintos. Los parámetros que rebasan la norma son: grasas y aceites, sólidos suspendidos totales (para cuerpo receptor tipo C) y coliformes fecales. De acuerdo al índice de calidad para aguas superficiales emitidos por la Comisión Nacional del Agua, respecto a la DBO₅ la calidad del agua del río en este punto es de “BUENA CALIDAD”. Para la DQO y SST la calidad es “CONTAMINADO”. Sin embargo, como se dijo anteriormente, el origen de los SST es natural.

El punto R-4, se ubicó próximo a la Laguna de Tuxpan. En este tramo se detectaron tres posibles descargas de AR de menor magnitud. La temperatura fue de 26.52°C ± 2.42, el pH de 7.94 ± 0.11 unidades ligeramente alcalino; la conductividad de 252 µS/cm ± 6.39 fue baja; las grasas y aceites, con 6.43 mg/L, fue más baja que en R-3. Las coliformes fecales aumentaron de 7.4 x 10³ NMP/100 mL a 8.6 x 10⁴ NMP/100 mL, debido a las descargas domésticas de AR gris y/o al pastoreo de ganado. En este punto tampoco se encontraron huevos de helmintos.

El caudal promedio de 361 L/s ± 15, fue mayor respecto al primer punto de muestreo y al anterior, lo que se apreció a simple vista. Este incremento favoreció la disminución de la materia orgánica, principalmente la no biodegradable. La DBO se encontró en 3.4 mg O₂/L y la DQO en 32.1 mg O₂/L; el nitrógeno total presentó 3.4 mg/L; los nitritos más nitratos y el fósforo total se mantuvieron

muy bajos y con valores constantes. Los sólidos suspendidos totales, con 98 mg/L, presentaron el valor más bajo, debido a la disminución en la velocidad del agua (por el ancho y profundidad), permitiendo que alrededor del 50% de los SST se sedimentaran, como lo constató la acumulación de limo sobre el fondo.

En este punto, las coliformes fecales rebasan la norma para ambos tipos de cuerpo receptor, mientras que los sólidos suspendidos totales no cumplen para el cuerpo receptor tipo “C”. De acuerdo a los índices de calidad para aguas superficiales emitidos por la Comisión Nacional del Agua, respecto a la DBO se considera de “BUENA CALIDAD”, respecto a la DQO, se considera “ACEPTABLE”, es decir que el río tiene capacidad de autodepuración. Respecto a los SST, la calidad se considera “ACEPTABLE”.

Calidad del agua en las Descargas

Todas las descargas puntuales de AR se detectaron dentro de la comunidad El Tomatal. En el primer punto D-1, las viviendas y negocios ubicados sobre la calle emiten aguas jabonosas. El caudal promedio fue de 0.12 L/s \pm 0.2. Como no cuenta con alcantarillado, las descargas se vierten directamente sobre la calle y escurren hacia una pequeña barranca. La temperatura del agua promedió 28.55°C \pm 1.56, el pH 8.14 \pm 1.33, alcalino; la conductividad aumentó durante el día, de 327 a 1,394 μ S/cm, con el máximo a las 14:40 hr, coincidiendo con el pH alcalino y condiciones salinas. Las grasas y aceites presentaron su máximo a partir del mediodía, promediando 38.15 mg/L \pm 14.61 por día. Las coliformes fecales son altas, presentando su mayor densidad entre las 11:40 y las 14:40 hr. La media diaria fue de 3.7×10^5 NMP/100mL. No se encontraron huevos de helmintos.

Los sólidos sedimentables presentaron 4 mg/L, y los suspendidos totales 360 mg/L. La DBO 572 mg/L, muy alta para ser AR municipal, puesto que representa 6.0 kg de DBO al día. Por otro lado, la DQO, con 1,228 mg/L, representa 12.72 kg de DQO/día. La relación DBO/DQO para este día fue 0.46, indicando baja biodegradabilidad del AR.

El nitrógeno total presentó 18.8 mg/L, predominando el nitrógeno amoniacal y orgánico (NTK), y bajas concentraciones de nitratos y nitritos, típico de

un AR. El fósforo total presentó 5.18 mg/L. La técnica aplicada no detectó metales pesados.

En el punto D-2, la descarga promedió un caudal de 6 ± 1.3 L/s, considerablemente mayor a las dos descargas anteriores, resultado del escurrimiento pluvial proveniente de la zona alta de El Tomatal, lo que además diluye el material orgánico y los sólidos sedimentables y suspendidos totales vertidos a la barranca.

La temperatura fue de $24 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.97$, el pH 7.45 ± 0.19 , neutro, la conductividad 885.25 ± 63.81 $\mu\text{S/cm}$. Estos parámetros no variaron significativamente durante el día. Las grasas y aceites con 7.96 mg/L, presentaron el máximo a las 18:00 pm.

Se obtuvo una densidad elevada de coliformes fecales y totales. La media geométrica diaria fue de 3.6×10^4 NMP/100 mL, con la mayor densidad entre las 9:00 y las 12:00 hr. No se detectaron huevos de helminto en el río.

La DBO fue de 13.2 mg O_2/L , y la DQO de 52.4 mg O_2/L , lo que equivale a una carga orgánica diaria de 6.8 kg DBO/día y 27.2 kg de DQO/día. La relación DBO/DQO fue de 0.25, indicando baja biodegradabilidad del AR. El nitrógeno total presentó 5.46 mg/L, y pocos nitritos y nitratos, con 0.22 mg/L. El fósforo total presentó 1.2 mg/L. No hubo presencia de materia flotante y la técnica aplicada no detectó metales pesados.

En el punto D-3 el caudal promedió 0.05 L/s ± 0.06 ; la temperatura $26.92^\circ\text{C} \pm 2.6$; el pH 7.6 ± 0.5 , ligeramente alcalino, y la conductividad 793.75 ± 148.26 $\mu\text{S/cm}$. En esta descarga se encontró la mayor presencia de coliformes fecales, con un promedio de 1.9×10^6 NMP/100 mL. Se encontraron dos huevos de helmintos de la especie *Hymenolepis diminuta*.

Los sólidos sedimentables alcanzaron 0.8 mL/L, y los suspendidos totales 145 mg/L, no presentó materia flotante. La DBO fue de 179 mg O_2/L y la DQO de 397 mg O_2/L , lo que quiere decir que se descarga 0.77 kg $\text{DBO}_5/\text{día}$ y 1.71 kg de DQO/día. La relación DBO/DQO fue de 0.45, indicando que es un agua residual no tratada. El nitrógeno total presentó 17.3 mg/L, la concentración de nitritos y nitratos 0.18 mg/L, el fósforo total 5.47 mg/L. La técnica aplicada no detectó metales pesados.

4.5 DISCUSIÓN

Las perturbaciones que modifican los corredores fluviales y sus ecosistemas asociados aparecen en forma natural (tormentas, ciclones, huracanes) o son inducidas por las actividades humanas. Pueden ocurrir por separado o, en ocasiones, simultáneamente. En cualquier caso, generan estrés sobre el corredor fluvial y tienden a alterar su estructura y con ello las funciones ecológicas asociadas (King 2003).

Las actividades humanas de principios de los 40's, generaron perturbaciones en el río El Tomatal relacionadas a la ampliación de la zona de cultivo, y la desviación del cauce natural hacia la Laguna de Tuxpan. El cauce modificado cambió la estructura y función ecológica del corredor fluvial, así como la frecuencia y magnitud de los caudales en las diferentes áreas. Está ampliamente documentado que la alteración del cauce de un río provoca cambios en el corredor fluvial al perturbar la morfología natural (rápidos y pozas) que son requeridos por ciertos organismos de la flora y fauna acuáticas, generando la pérdida de nichos y especies. La modificación del cauce también altera las velocidades del caudal y reduce la diversidad de hábitats para los macroinvertebrados, esenciales en el mantenimiento de la red trófica. Por lo tanto, debe conservarse el caudal ecológico del río para atenuar los cambios en la hidrología y geomorfología de la microcuenca, y en la morfología del corredor fluvial (Brown y King 2003a).

El curso actual del río aumentó el aporte de sedimentos al lago y su azolvamiento, como lo constata la batimetría. Si el río transporta unas 18,700 t de sedimento al año, mediante unos 24,494,400 m³ de precipitación que escurre por el río Tomatal, se estima en unos 127 años la pérdida total del lago, geológicamente poco tiempo si consideramos que el lago tiene unos 5,000 años de existencia.

El tiempo de residencia del agua es de 6.8 años, considerando únicamente la aportación de todas las micro cuencas, y sin descontar las salidas de la cuenca, ni la evaporación, ni las fluctuaciones anuales entre años más húmedos o más secos.

Además del aporte directo de sedimentos de la cuenca, el río El Tomatal se encuentra alterado a causa de los desechos municipales y otros elementos derivados de las actividades de la comunidad de la colonia, de la cual parten tres descargas principales de AR que son vertidas al aire libre sin ningún control, y que llegan directamente al río después de arrastrar a su paso basura, materia orgánica, heces fecales, grasas y aceites, contaminando el agua con coliformes fecales y detergentes, entre otros. También presenta contaminación difusa derivada de agroquímicos, que fertilizan el agua incrementando la materia orgánica. Presenta una alta concentración de sólidos suspendidos totales de origen natural (no derivados de las aguas residuales). En forma secundaria, los químicos de la agricultura unidos a los sedimentos suelen incrementar la salinidad de los suelos. Todos estos factores provocan la pérdida de hábitats y de especies de flora y fauna, así como de las pesquerías que son el medio de subsistencia de la población de Tuxpan, factores que deben controlarse mediante el manejo de agroquímicos menos perseverantes, de otros contaminantes y de los desechos derivados de la población.

Si bien el grado de contaminación del río por materia orgánica se encuentra por debajo de la norma y del índice de calidad del agua, es indispensable instalar colectores de aguas residuales que las conduzcan a un sistema de tratamiento y desinfección descentralizado, cuya construcción urge, e impedir que se sigan vertiendo directamente al río, ya que la evaluación de las aguas residuales de la colonia El Tomatal muestra que presentan un alto contenido de materia orgánica, coliformes fecales, huevos de helmintos, grasas y aceites.

También se sugiere controlar la erosión de las laderas de las microcuencas del lago y del río; la invasión humana de la zona federal de las riveras y los corredores fluviales; y la contaminación de origen humano. Esto serviría para atenuar la alteración de la calidad del agua del río generada a nivel de microcuenca y dentro del corredor fluvial, así como para evitar el impacto local dentro del lago del aporte de gran cantidad de sedimentos, nutrientes y basura.

Es necesaria la reforestación del corredor fluvial, dando la estructura adecuada a la comunidad de plantas, para regular el caudal natural del río y para contener el transporte y aporte de sedimentos y de sólidos suspendidos al río, y con ello evitar el azolve del lago. Esta medida favorecerá la infiltración y la movilidad del agua tanto en el río El Tomatal como en la Laguna de Tuxpan, regulando la

periodicidad y la magnitud de los caudales provocados por los eventos torrenciales, que pueden causar inundaciones en los alrededores y que ponen en riesgo a la los asentamientos humanos en las franjas de amortiguación.

La Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1ro de diciembre de 1992, con texto vigente a la última reforma publicada DOF 18-04-2008 (CONAGUA 2008), en su Título Primero: Disposiciones Preliminares en su Capítulo Único, Artículo 3, en su Fracción XLVII señala a la “ Ribera o Zona Federal”, como “las fajas de diez metros de anchura contiguas al cauce de las corrientes a partir del nivel de aguas máximas ordinarias.” La amplitud de la ribera o zona federal será de cinco metros en los cauces con una anchura no mayor de cinco metros. El nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la creciente máxima ordinaria que será determinada por “La Comisión” o por el Organismo de Cuenca que corresponda, conforme a sus respectivas competencias, de acuerdo con lo dispuesto en los reglamentos de esta Ley. En los ríos, estas fajas se delimitarán a partir de cien metros río arriba, contados desde la desembocadura de éstos en el mar En los cauces con anchura no mayor de cinco metros, el nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la media de los gastos máximos anuales producidos durante diez años consecutivos. Estas fajas se delimitarán en los ríos a partir de cien metros río arriba, contados desde la desembocadura de estos en el mar. En los orígenes de cualquier corriente, se considera como cauce propiamente definido, el escurrimiento que se concentre hacia una depresión topográfica y forme una cárcava o canal, como resultado de la acción del agua fluyendo sobre el terreno. La magnitud de la cárcava o cauce incipiente deberá ser de cuando menos de 2.0 m de ancho por 0.75 m de profundidad”.

Fracción XLVIII. “Río”. Corriente de agua natural, perenne o intermitente, que desemboca a otras corrientes, o a un embalse natural o artificial, o al mar.

Considerando la topobatimetría del río El Tomatal y la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, así como el ancho de 6.5 m promedio del río, la propiedad federal a ambos lados del río es una franja de 5 a 10 m de ancho. “La Comisión”, o el Organismo de Cuenca que corresponda, conforme a sus respectivas competencias, deberán calcular el nivel de aguas máximas ordinarias a partir de la creciente máxima ordinaria, de acuerdo con lo dispuesto en los reglamentos de esta Ley.

La introducción de especies exóticas, accidental o intencional, también causa cambios en las relaciones ecológicas de dispersión, competencia, depredación, hibridación y favorece la propagación de enfermedades entre las especies Richter et al. (2006). *Hypostomus* sp, es una especie exótica invasora que habita en aguas dulces poco profundas, que ingiere los huevos y/o larvas de las especies nativas o introducidas, exterminándolas al depredarlas y competir con éstas por el alimento. Son considerados como: “Una de las mayores amenazas para la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos continentales y para las pesquerías de agua dulce” (Mendoza et ál. 2007), y por lo mismo se sugiere el estudio de las especies de peces para generar un plan de manejo de *Hypostomus* sp en la Laguna de Tuxpan con el fin de proteger las pesquerías.

4.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1^o Considerando las características batimétricas del río Tomatal, y acorde con la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, y tomando en cuenta que el ancho promedio del río es de 6.5 m, se puede establecer como propiedad federal una franja a ambos lados del río de entre 5 y 10 m de ancho. Franja que como señala la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento tiene que ser analizada y determinada por “La Comisión” o el Organismo de Cuenca correspondiente.

2^o Aunque existe una alta concentración de sólidos suspendidos totales en el río, el aporte de los mismos es de origen natural y no es causado por el vertido de las aguas residuales. Sin embargo, se sugiere controlar la erosión de las laderas mediante la reforestación de la subcuenca, la estabilización de cárcavas para evitar la erosión, la construcción de represas a lo largo del cauce para contener los sedimentos, y el cambio a agroquímicos menos recalcitrantes.

3^o La modificación del cauce y corredor fluvial del río Tomatal generó una cadena de efectos, como aumentar el aporte de sedimentos, desechos municipales, agroquímicos, contaminantes y nutrientes. Por lo tanto, la estrategia que se sugiere es la reforestación del corredor fluvial con vegetación nativa para contener el transporte y aporte de sedimentos y de sólidos suspendidos al río, y la desviación del río Tomatal por la zona del INIFAP, para que la carga de sedimentos ya no azolve más la Laguna de Tuxpan.

4^o La invasión de especies exóticas reduce las áreas de desove, refugio y crianza de las especies nativas, altera las características del sistema y sus alrededores. Se sugiere el análisis de la composición, estructura y función de las especies de peces en la Laguna de Tuxpan para diseñar las estrategias de recuperación y conservación del río y de las pesquerías del lago.

4.7 REFERENCIAS

- ARTHINGTON, A.H. 1998. *Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: Review of Holistic Methodologies*. Occasional Paper No. 26/98. Land and Water Resources Research and Development Corporation: Canberra, Australia.
- ARTHINGTON, A.H., y R. LLOYD. 1998. *Logan river trial of the guiding block methodology for assessing environmental flow requirements*. Workshop Report. Centre for Catchment and In-stream Research and Development Natural Resources: Brisbane, Australia.
- BAYLEY, P. B., 1995. Understanding large river-floodplain ecosystem. *BioScience* 45(3): 154-158.
- BROWN, C. y J. KING, 2003a. Environmental Flows: Concepts and Methods. En: *Water Resource and Environment Technical Note 1*. (Eds). Davis, R. y R. Hirji. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington D.C.
- BROWN, C. y J. KING, 2003b. Environmental Flows: Case Studies. En: *Water Resources and Environment*. (Eds.). Davis, R. y R. Hirji. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington, D.C.
- BROWN, C. y J. KING, 2003c. Environmental Flows: Flood Flows. En: *Water Resources and Environment*. (Eds). Davis, R. y R. Hirji. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington, D.C.
- BROWN, y H. SABET., 2003, A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers. *River Research and Applications* 19: 619- 639.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) 2009. *Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento*. 2ª. Edición. CONAGUA-SEMARNAT. México.
- EPA. 2017. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2000_06_30_305b_98report_98summary.pdf; Brown y King 2003 a, b y c).
- HEC-RAS versión 4.1, 2005. *US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center*.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. 2013. *Estudio para la Identificación de las Causas Niveles y Grado de Contaminación Ambiental en la Laguna de Tuxpan, Guerrero y Propuestas para el Tratamiento de las Aguas Residuales Descargadas en Ella y sus Afluentes*. IMTA-CAPASEG. Informe Final. Tomo I. Convenio CCE.01.04.3.0.2013.-0231. México.
- KING, J., C. BROWN, y H. SABET. 2003, A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers. *River Research and Applications* 19: 619- 639.
- LEWIS, M.A. 1992. Periphyton photosynthesis as an indicator of effluent toxicity: relationship to effects on animal tests species. *Aquat Toxicol*. 23270:288.

- LYTLE, D.H. y N.L. POFF, 2004. Adaptation to natural flow regime. *Trends in Ecology and Evolution* 19: 94-100.
- MORENO, B.J.E., J.A. CASTILLO G., J.M. ÁNGELES H., B. DE LEON M., R. NAMUCHE V., P. PACHECO H, E. PEÑA P., H.E.K. UNLAND W., J. VILLAMIL P., J.L. NAVA H., 2006. *Replanteamiento del Proyecto Ejecutivo para la Tecnificación del Distrito de Riego 068, Tepeocuilco-Quechultenango, Estado de Guerrero, Zona Iguala*. Informe Final. Subcoordinación de Ingeniería de Riego. Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- MUÑOZ, C.A. 2008. *Caracterización y Tratamiento de Aguas Residuales*. Tesis de Ingeniero Industrial. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.
- RICHTER, B.D., A.T. Warner, J.L. Meñyer y K. Lutz. 2006. "A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations". *River Research and applications*, 22: 297-318.
- RUSSELL, D.L. 2013. *Tratamiento de Aguas Residuales*. Un Enfoque Práctico. Editorial Reverté. México.
- THARME R.E., 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications* 19. 397 – 441.
- VÁZQUEZ, R., (2013). *Aguas Residuales. Capítulo 2*. Disponible en la Web. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/vazquez_r_d/capitulo2.pdf. Consultado el 21 de septiembre de 2013.



Limnología de la Laguna de Tuxpan

EDITORES:

Luis A. Bravo Inclán.
J. Javier Sánchez Chávez.
Ariosto Aguilar Chávez.
Jorge Izurieta Dávila.

CONTENIDO

Capítulo 5

5.1 INTRODUCCIÓN	176
5.2 ÁREA DE ESTUDIO	178
5.3 MÉTODOS	179
5.3.1. Batimetría	179
5.3.2. Calidad del agua	180
5.4 RESULTADOS	184
5.4.1. Morfometría del lago	184
5.4.2. Representación tridimensional batimétrica y curva de elevaciones capacidades	185
5.4.2. Perfiles de temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, turbidez y potencial redox	188
5.4.3. Evaluación de la calidad del agua del lago	189
5.4.4. Evaluación del estado trófico	198
5.5 DISCUSIÓN	200
5.6 CONCLUSIONES	202
5.7 REFERENCIAS	204

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.3.1. Puntos de muestreo en el lago “Laguna de Tuxpan”, Guerrero (modificada de IMTA 2013).	181
Figura 5.4.1. A.- Modelo digital de profundidades de la Laguna de Tuxpan; b.- Corte longitudinal orientación noroeste – sureste, de la Laguna de Tuxpan, Gro. (modificada de IMTA 2013).	187
Figura 5.4.2. Curva elevaciones – capacidades – áreas de la Laguna de Tuxpan (modificada de IMTA 2013).	187

Figura 5.4.3. Perfiles verticales de temperatura, CE (Conductividad eléctrica), oxígeno disuelto, PH, turbidez y potencial de óxido reducción (ORP) en la estación E-2 centro, durante los meses de agosto, septiembre (lluvias) y enero (secas), Laguna Tuxpán, Gro. (modificada de IMTA 2013).	191
Figura 5.4.4. Resultados de temperatura del agua, potencial de hidrógeno, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, disco de secchi y turbidez en la Laguna de Tuxpan, Gro. (modificada de IMTA 2013).	195
Figura 5.4.5. Resultados de sólidos suspendidos totales (SST), dureza total, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), SAAM y grasas y aceites en la Laguna de Tuxpan, Gro. (modificada de IMTA 2013).	196
Figura 5.4.6. Resultados de fósforo total, nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico, nitrógeno total, coliformes totales y coliformes fecales en la Laguna de Tuxpan, Gro. (modificada de IMTA 2013).	197

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 5.3.1. Localización de los puntos de muestreo dentro de la Laguna de Tuxpan, Gro. (modificada de IMTA 2013).	181
Cuadro 5.3.2. Parámetros de calidad del agua (volúmenes, preservación y recipientes de muestreo utilizados) (modificada de IMTA 2013).	182
Cuadro 5.4.1. Principales características de la Laguna de Tuxpan y su subcuenca.	185
Cuadro 5.4.2. Límites tróficos para lagos y embalses. O-M, transición entre oligo y mesotrófico; M-E, transición entre meso y eutrófico; E-H, transición entre eutrófico e hipertrófico.	198
Cuadro 5.4.3. Resultados promedio y del índice de estado trófico de la Laguna de Tuxpan, Gro. (modificada de IMTA 2013).	199

5.1 INTRODUCCIÓN

El manejo inadecuado de los recursos naturales favorece la degradación de las cuencas hidrológicas. El constante aumento de las descargas puntuales y difusas de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales, incrementa el aporte de nutrientes y contaminantes a los ríos, lagos y presas, lo que deteriora la calidad del agua y limita el aprovechamiento de dicho recurso. Este proceso se denomina eutroficación cultural, y se prevé que se complicará con el cambio climático (Wetzel 2001).

De acuerdo con Cooke et al. (2005), la calidad del agua de lagos y embalses continúa deteriorándose en muchas áreas del mundo, incluyendo México (Lind et al. 1992; Chacón-Torres y Rosas-Monge 1998; Olvera et al. 1998; Bravo-Inclán et al. 2010). Tal degradación se debe principalmente a la falta de planificación y manejo integrado de los recursos, afectando a la sostenibilidad de los ecosistemas y provocando problemas en las cuencas como deforestación, erosión y contaminación del agua.

El término eutroficación cultural se utiliza para describir el acelerado aporte indeseable de nutrientes derivados de las actividades humanas, especialmente fósforo (P) y nitrógeno (N). La presencia de estos nutrientes provoca la proliferación intensa de algas y/o plantas acuáticas vasculares (hidrofitas) que, junto con el aporte de materia orgánica, sólidos y otros elementos químicos, cambian la calidad del agua y alteran a las comunidades acuáticas interfiriendo con el reúso del agua (Margalef 1980).

La clasificación de lagos y embalses acorde con la calidad de su agua y grado trófico, son temas importantes de la Limnología aplicada y de la Ingeniería Ambiental. La clasificación y el monitoreo permiten diseñar planes de rehabilitación con metas y objetivos específicos (Nürnberg 1996; Holdren et al. 2001; Cooke et al. 2005; Bravo-Inclán et al. 2010).

La Laguna de Tuxpan presenta los problemas asociados al manejo no planificado. Para conservar la calidad del agua y la integridad ambiental de su cuenca, se debe monitorear la limnología del cuerpo de agua y la demotecnia de la cuenca, elaborar la diagnosis y analizar la factibilidad de rehabilitarlos y prevenir o posponer su eutroficación, su azolve y, en general, su deterioro gradual mediante métodos de manejo y rehabilitación sustentados científicamente. Por lo anterior, en este estudio se analizan las características batimétricas y limnológicas (físico-químicas e indicadores biológicos) de la “Laguna de Tuxpan” durante las temporadas de lluvias y de estiaje, para conocer la capacidad actual del lago y evaluar el estado trófico del cuerpo de agua.

5.2 ÁREA DE ESTUDIO

La Laguna de Tuxpan es un lago de origen tectónico ubicado entre los paralelos 18°13" y 18°27" de latitud Norte y entre los 99°29" y 99°42" de longitud Oeste. En los alrededores del lago la economía depende principalmente de la pesca y el comercio del mango (exportación a los EE.UU.). También se presenta la ganadería (pastoreo de bovinos y caprinos), y la agricultura de temporal (maíz, sorgo y cacahuete) y de riego (hortalizas, flores y frutales). En este caso, resultan particularmente importantes los servicios turísticos (restaurantes en la rivera del cuerpo de agua), con instalaciones muy rústicas.

En las últimas décadas, la subcuenca y el lago se han deteriorado ambientalmente derivado de la sobreexplotación del bosque para extraer leña, carbón y postes; del sobrepastoreo de los agostaderos efectuado por 1,250 cabezas de bovinos y 600 cabezas de caprinos; y de la agricultura sobre terrenos cuya pendiente va 2 a 20%, con diversos grados de erosión en unas 2,070 ha, que incluyen 164 ha de cárcavas y 392 ha de tepetate, con la consecuente pérdida de productividad de los sistemas agropecuarios y azolvamiento de 66 ha de la Laguna de Tuxpan, con pérdida del volumen y calidad del agua.

La erosión hídrica de ligera a severa, en las zonas altas deforestadas (un 50% del área presenta erosión con formación de cárcavas), que introduce azolve a los afluentes de agua residual municipal procedentes notablemente de la Subcuenca del río El Tomatal (especialmente del penal), además del lavado de ropa en la orilla del lago por visitantes y pobladores de Tuxpan, así como el desalojo de desechos de los restaurantes ubicados en la rivera del cuerpo de agua, tienen efecto directo en la contaminación del agua y la reducción de la superficie y la profundidad del lago (González Mateos et al. 2007).

5.3. MÉTODOS

5.3.1. Batimetría

Las isobatas del lago se determinaron mediante una ecosonda Garmin modelo GSPMAP serie 400, provisto de un GPS que permite registrar cada tres segundos la trayectoria de la nave durante su desplazamiento así como la profundidad de un sitio. Un desplazamiento lento permite registrar mayor número de sitios. La información se almacena en la memoria y posteriormente se transfiere a una PC para procesarla. El equipo de levantamiento batimétrico utilizado para el estudio consistió en un RiverSurveyor M9 Doopler multihaz con estación RTK y señal de radio, montado en una estructura de aluminio a un costado de la embarcación.

Las corrientes en profundidad se determinaron con un equipo de efecto Doppler marca Sontek modelo M9, con una sonda de perfilación acústica vertical con resolución de hasta 0.01 m, y medición de profundidades dentro del ámbito 0.20 a 80 metros. La posición de la lancha se definió con el sistema de posicionamiento RTK GPS (*real time kinematic*, o navegación cinética satelital) en la cual una estación de referencia proporcionó correcciones en tiempo real, para generar una exactitud submétrica en los desplazamientos de la embarcación.

Se realizaron recorridos perimetrales y transversales en sentido este-oeste y norte-sur, sobre transectos espaciados cada 100 m y velocidades menores a 15 km/h para minimizar la pérdida de la señal. Los datos se representaron tridimensionalmente mediante un modelo digital de elevaciones con ayuda del software Tecplot. El método TIN (Triangle Interpolation Network) se describe con más detalle en la documentación del usuario de ArcGIS (ESRI 2011).

5.3.2. Calidad del agua

Acorde con los requerimientos señalados en los métodos para cumplir con la norma NMX-AA-014-1980 (cuerpos receptores – muestreo) y con los procedimientos de la metodología para evaluar la eutroficación de lagos cálidos tropicales (Castagnino 1982; Salas y Martino 1991; Olvera-Viascán et al. 1998), algunas muestras fueron tomadas en envases de plástico o vidrio previamente enjuagados dos veces con el agua de muestreo y se mantuvieron a 4°C durante el transporte al laboratorio (algunas muestras fueron fijadas con ácido u otro preservador).

La caracterización fisicoquímica y biológica se realizó durante las estaciones de secas (enero) y lluvias (septiembre). En concordancia con la morfología del lago, se establecieron cinco sitios de muestreo para determinar la calidad del agua por la influencia del río tributario (El Tomatal), a la salida del lago (cerca del Canal de Llamada) y en la proximidad del poblado de Tuxpan. Las muestras para evaluar las variables físico-químicas y biológicas se obtuvieron a 0.5 m de la superficie de cada sitio, y una a 0.5 m por arriba del fondo en E-2, centro (Cuadro 5.3.1 y la Figura 5.3.1).

En cada sitio se midió la profundidad de visión del disco de Secchi (DS). Las muestras de superficie de clorofila a (*Cl a*), se obtuvieron en una botella Van Dorn, mediante el método de manguera a dos veces el valor del DS.

Los parámetros por muestra de agua que se incluyeron en la presente evaluación fueron:

Mediciones *in situ*.- Mediante un Disco de Secchi y de una sonda multiparámetros marca YSI modelo 6600-D, previa calibración con estándares vigentes y de marca, que mide temperatura (°C), conductividad eléctrica (CE, $\mu\text{S}/\text{cm}$), sólidos disueltos totales (SDT, mg/L), pH, potencial de óxido-reducción (Redox, mV), oxígeno disuelto (OD, mg/L) y turbidez (UNT),

- Parámetros fisicoquímicos enlistados en el Cuadro 5.3.2.
- Parámetros biológicos.- Coliformes fecales y totales; toxicidad a *Vibrio fisheri*, (bacteria), *Daphnia magna* (cladóceros, zooplancton) y *Pseudokichnerella subcapitata* (alga) (Cuadro 5.3.2). En los Capítulos 6 y 7 se describe

la metodología para identificar el fitoplancton, la cuantificación de algas y la obtención de Microcistina – LR.

Para evaluar el estado trófico del cuerpo de agua y determinar su longevidad en función del ingreso de azolve, se aplicó el Índice de Estado Trófico (IET), para compararlo con los límites internacionales y determinar la evolución del cuerpo de agua en relación con el cumplimiento de los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001-89).

Cuadro 5.3.1. Localización de los puntos de muestreo dentro de la Laguna de Tuxpan, Gro. (modificada de IMTA 2013)

Clave de la estación	Nombre de la estación	Descripción	Longitud norte	Latitud oeste
E-1	Seno noroeste	Cerca de la salida del canal de Llamada	18° 21' 44.5"	99° 29' 44.2"
E-2	Centro	En el centro del lago de acuerdo con su morfología	18° 21' 16.1"	99° 29' 25.9"
E-3	Sur	Estación ubicada cerca del primer muelle, al sur del cuerpo de agua	18° 20' 58.5"	99° 29' 32.7"
E-4	Tomatal	Frente a la entrada del río Tomatal	18° 21' 20.6"	99° 29' 49.9"
E-5	Seno este	Frente al poblado de Tuxpan	18° 21' 09.3"	99° 29' 07.0"

Fuente: Modificada de IMTA 2013

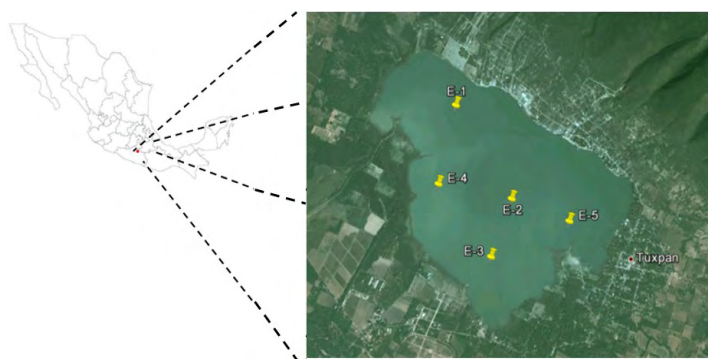


Figura 5.3.1. Puntos de muestreo en el lago “laguna de Tuxpan”, Guerrero (modificada de IMTA 2013).

Cuadro 5.3.2. Parámetros de calidad del agua (volúmenes, preservación y recipientes de muestreo utilizados; (modificada de IMTA 2013)

Parámetro	Volumen (mL)	Recipiente	Preservación	Caducidad (días)
SST	1 000	Plástico	Refrigeración	7 <u>1/</u>
Sulfatos	200	Plástico	Refrigeración	60 <u>1/</u>
Cloruros	100	Plástico	Refrigeración	7 <u>1/</u>
Alcalinidad total	100	Plástico	Refrigeración, sin espacio de aire	1 <u>1/</u>
Fósforo total y fosfatos totales	1 000	Plástico	Refrigeración	28 <u>1/</u>
Nitrógeno de nitratos	50	Plástico o vidrio	Refrigeración	48 hrs
Nitrógeno de nitritos	300	Plástico o vidrio	H ₂ SO ₄ , pH<2, refrigeración	24 hrs
Nitrógeno amoniacal	200	Plástico	H ₂ SO ₄ , pH<2, refrigeración	7 <u>1/</u>
Nitrógeno orgánico	1 000	Plástico	H ₂ SO ₄ , pH<2, refrigeración	28 <u>1/</u>
SAAM	200	Plástico	HCl pH<2, refrigeración	7 <u>1/</u>
Grasas y aceites	1 000	Vidrio, boca ancha	Refrigeración	28 <u>1/</u>
DBO ₅	1 000	Plástico	H ₂ SO ₄ , pH<2, refrigeración	1 <u>1/</u>
DQO	100	Vidrio	HNO ₃ , pH<2, refrigeración	28 <u>1/</u>
Plomo	1 000	Plástico o Vidrio	HNO ₃ , pH<2, refrigeración	6 meses
Dureza total	100	Plástico o Vidrio	HNO ₃ , pH<2, refrigeración	6 meses
Coliformes fecales y totales	300	Bolsa estéril	Refrigeración	1
Toxicidad.- <i>Vibrio fischeri</i>	40	Vidrio ámbar prelavado,	Refrigeración	5
Toxicidad.- <i>Daphnia magna</i>	600	Vidrio ámbar prelavado	Refrigeración	5
Toxicidad.- <i>Pseudokirchnerella subcapitata</i>	600	Vidrio ámbar prelavado,	Refrigeración	5

Parámetro	Volumen (mL)	Recipiente	Preservación	Caducidad (días)
Clorofila a	1 000	Plástico o vidrio	5 gotas de MgCO ₃ y refrigeración (a).	48 horas. Sin filtrar (a) 28 días. Filtrada (b)
Fitoplancton	125	Vidrio	5 mL de formol	--
Cuantificación de algas	1 000	Plástico o vidrio	7 mL de lugol/ L	--
Microcistina – LR	1 000	Vidrio ámbar	Refrigeración	30
Materia orgánica en sedimento	+/- 300 g	Bolsa de plástico		--

Fuente: Modificada de IMTA 2013

5.4 RESULTADOS

5.4.1 Morfometría del lago

A mediados de octubre, se determinó una profundidad máxima del lago de 7.86 m, un volumen (V) de $18.896 \times 10^6 \text{ m}^3$ y un área superficial (A) de $4.119 \times 10^6 \text{ m}^2$ (IMTA 2013). Con estos datos, se calculó la profundidad media correspondiente, siendo de 4.59 m:

$$\check{Z} = V / A \quad (1)$$

$$\check{Z} = V / A = 18.896 \times 10^6 \text{ m}^3 / 4.119 \times 10^6 \text{ m}^2 = 4.59 \text{ m} \quad (2)$$

La profundidad máxima de 7.86 m y profundidad media de 4.59 m clasifica al lago como un cuerpo de agua somero según Gulati et al. (2007) que indica que los lagos someros son menores a 9 - 10 m; y Cooke et al. (2005), que establece que los cuerpos de agua someros tienen una profundidad media $< 3 \text{ m}$, y debido a la profundidad relativa de 1.09%, valor inferior al 2% que coincide con la definición de un lago somero, aunque no necesariamente pequeño, y más o menos próximo a su colmatación final (Del Castillo, 1992). En el Cuadro 5.4.1, se resume la información del área de estudio.

Cuadro 5.4.1. Principales características de la Laguna de Tuxpan y su cuenca

Altitud (m.s.n.m.)	749
Volumen del lago ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	8.896
Área del lago (km^2)	4.119
Área de la subcuenca (km^2)	70.0
Relación área de subcuenca : área de lago	17.0
Profundidad máxima (m)	7.86
Profundidad media (m)	4.59
Largo máximo (km)	2.7
Ancho máximo (km)	1.9
Clima	Cálido subhúmedo seco (Aw_0 (w)(i')g)
Temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$)	25.5
Precipitación media anual (mm)	1 067

Fuente: área de la cuenca y el clima.- tomado de González Mateos et al., 2007. Volumen y área del lago realizados en el presente estudio por el IMTA (Modificada de IMTA 2013).

5.4.2 Representación tridimensional batimétrica y curva de elevaciones – capacidades

La Figura 5.4.1, muestra el perfil batimétrico tridimensional de la cubeta lacustre, las áreas correspondientes a las profundidades, y el perfil batimétrico sobre un corte longitudinal del lago. En la margen Oeste-suroeste, en la vecindad de la desembocadura del río El Tomatal, se observa claramente la disminución de la profundidad debido a la acumulación de sedimentos, evaluados en 18.7 mil toneladas que aporta la subcuenca El Tomatal anualmente. La zona Noroeste, en la vecindad de la entrada del Canal de Llamada, presenta el mismo problema. La zona Suroeste se muestra como una zona de estabilización en la distribución de los sedimentos en el lago, mientras que la porción más profunda se observa en la zona Este, la más alejada de la desembocadura del río.

Esta figura también permite apreciar que el lago era relativamente profundo (similar a un vaso), pues las paredes originales al Este y Sur del lago, y en la península que irrumpe por el Noroeste, son prácticamente verticales como lo demuestra el corte longitudinal.

Con la información del levantamiento batimétrico, se calcularon los volúmenes y áreas del cuerpo de agua para las diferentes profundidades y se elaboró la Figura 5.4.2, con la curva respectiva de elevaciones (abscisas) vs capacidades (ordenadas de la izquierda), y áreas (ordenadas de la derecha). Los datos indican que las elevaciones variaron entre los 441.71 y los 749.57 msnm, y el volumen fue de 18,895.536 m³ asociados a un área de 4, 119,001.00 m².

Si bien la curva roja de elevación vs volumen presenta un comportamiento homogéneo, y corresponde a un lago relativamente somero (con forma de plato) la curva azul, de elevación vs área, aún muestra la concavidad negativa característica de un lago relativamente profundo. La modificación de la morfología de la cubeta lacustre tiene efectos importantes en los patrones de distribución de la energía solar que ingresa al lago. En los lagos profundos esta no alcanza a llegar al fondo, tendiendo a acumularse en la capa superior y a estratificar la columna de agua, a menos que el viento lo impida, lo que ocurre en lagos cuya profundidad absoluta es pequeña. Mientras que en los someros, el viento tiende a enturbiar el agua al levantar los sedimentos de las zonas menos profundas. Ambos fenómenos tienen consecuencias importantes sobre la composición, estructura y funcionamiento de la comunidad acuática (Wetzel 2001).

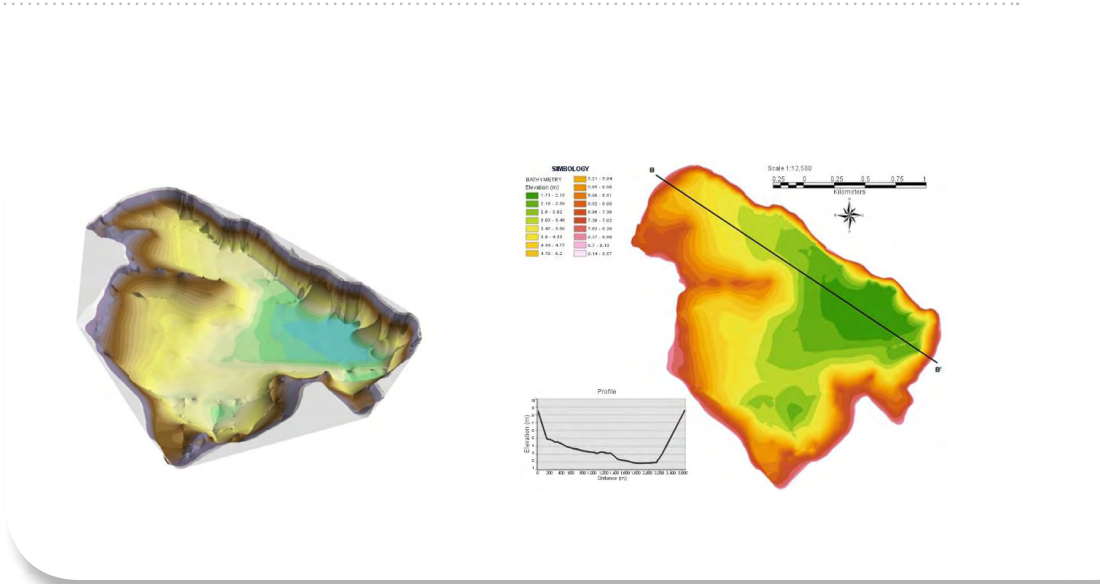


Figura 5.4.1. A.- Modelo digital de profundidades de la Laguna de Tuxpan; b.- corte longitudinal orientación noroeste – sureste, de la Laguna de Tuxpan, Gro. (modificada de IMTA 2013).

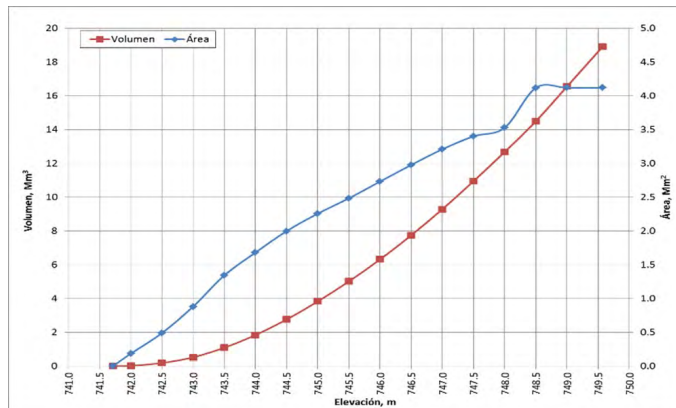


Figura 5.4.2. Curva elevaciones – capacidades – áreas de La laguna de Tuxpan (modificada de IMTA 2013).

5.4.2 Perfiles de temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, turbidez y potencial redox

Las Figuras 5.4.3 a 5.4.8, muestran el comportamiento de los datos fisicoquímicos y biológicos. La columna de agua muestra homogeneidad térmica desde la superficie hasta el fondo, con ausencia de termoclina y variaciones graduales menores a 2 °C, características que ubican al lago como de circulación continua (Figura 5.4.3). Si bien se realizaron perfiles en los cinco puntos de muestreo debido a la homogeneidad espacial de los resultados, sólo se presenta el perfil del sitio más profundo (Centro, E-2).

En la Figura 5.4.3 los datos de agosto de 2013 están en rojo, septiembre de 2013 en azul y enero de 2014 en verde. En el perfil vertical se observa que la temperatura disminuye 3 °C en forma continua de la superficie al fondo, sin formar termoclina. En el tiempo, la temperatura aumenta de un promedio de 22.4 °C en agosto, a 26.5 °C en septiembre y 29.4 °C en enero (estiaje), siguiendo al cambio estacional. Así, la temperatura varió en 7.0 °C desde las lluvias (verano) a secas (invierno). En la superficie la temperatura presentó una variación ligeramente mayor, de 22.3 a 31.05 °C entre los meses de lluvias y secas, respectivamente, debido a un menor retardo en su calentamiento respecto a las zonas profundas.

La conductividad eléctrica (CE), que representa la concentración de sales disueltas en el agua, osciló de un mínimo de 306 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en agosto, en E-4, a un máximo de 445 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en septiembre, en E-2. En promedio mensual, la CE tuvo poca variación, de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en agosto a 420 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en septiembre y enero. Estos resultados hacen evidente el efecto de las lluvias al diluir el agua del río y del lago, y de la evaporación al concentrarla.

La curva que describe la concentración de oxígeno disuelto (OD) en la columna de agua, u oxiclina, se caracteriza por tener valores más altos en la superficie que van disminuyendo con la profundidad. La máxima concentración de OD, se detectó en enero en E-1 con 7.41 mg/L, y la concentración mínima en agosto en la parte profunda de E-2 con 0.44 mg/L (Figura 5.4.3). Este último dato junto con la poca profundidad de la columna de agua y el predominio del zooplankton sobre el fitoplancton, implica una alta oxidación de residuos orgánicos en el piso del lago

y que la capacidad de autodepuración del sistema está siendo rebasada, lo que es típico de los lagos eutróficos (Lampert y Sommer 1997).

El pH ligeramente alcalino en la columna de agua, cumple con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001-1989), con un mínimo de 7.74 y un máximo de 8.6 unidades en agosto en E-2 y similar en E-1, este último considerado como no favorable para realizar la fotosíntesis en algunos organismos.

La turbidez presentó valores bajos en la capa superior de agua de 3 a 4 m de espesor, que oscilaron entre 5 y 15 NTU. Sin embargo, por debajo de los 4 a 4.5 m, se detectó un incremento significativo que en ocasiones duplicó al valor superficial. Los valores más altos se obtuvieron en el mes de septiembre, lo que se explica por el efecto del viento con las fuertes avenidas de la temporada de lluvias.

El potencial de óxido-reducción (Redox), presentó valores positivos en la mayoría de los puntos y profundidades. En todas las muestras se encontraron valores por arriba de 20 mV. Sin embargo, a una profundidad de 4 a 5 m, en E-2 y E-5 se registraron valores negativos, (-200 mV), aspecto que señala condiciones reductoras que coinciden con los valores bajos de OD obtenidos en el fondo cerca del sedimento.

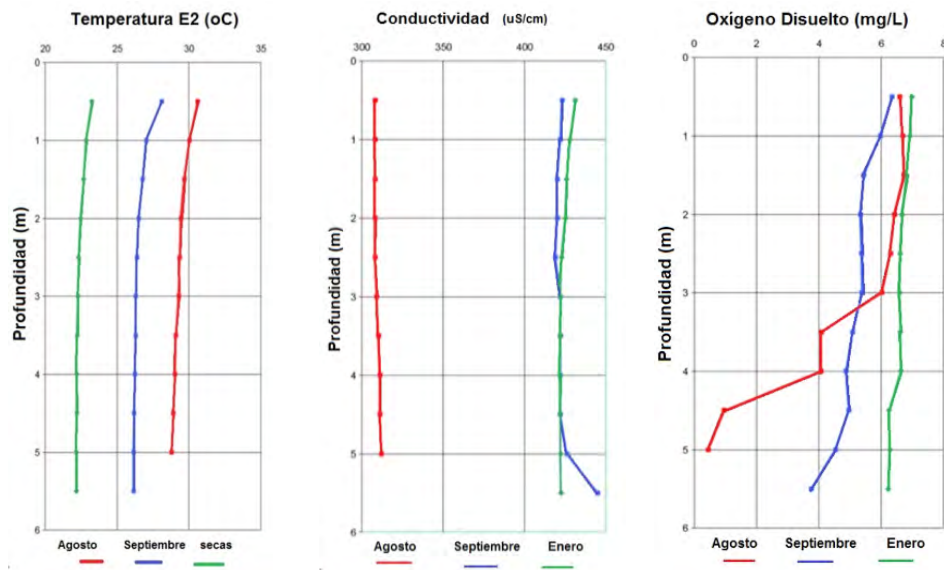
5.4.3 Evaluación de la calidad del agua del lago

El análisis de la calidad del agua del lago a través de los datos fisicoquímicos y biológicos, y su comparación con:

- Los límites máximos permisibles (LMP) de los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001-1989, o CECA);
- Los Criterios de Protección a la Vida Acuática (PVA);
- Los Criterios Ecológicos para uso en Riego Agrícola (RA) y/o Uso Público Urbano (UPU) a falta de datos para la clasificación CECA;
- La DBO_5 y DQO_5 , a través de los Metas de Calidad del Agua definidas por la Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua (CONAGUA 2005).

Señalan que el lago es un cuerpo de agua somero, con una variación de la profundidad de 3.70 m (E-4) a 6.25 m (E-5), y que las lluvias de agosto a septiembre incrementaron el nivel del agua en 0.6 m, y la evaporación en estiaje la disminuyó en 0.3 m. Que la temperatura presentó un promedio de 25.0°C, con el mínimo de 24.17 °C en la zona más profunda (E-2).

Por lo tanto, el lago se clasifica como un cuerpo de agua cálido tropical con un promedio anual mínimo de 15°C; alcalino, con un pH mínimo de 7.94 (E-2 fondo, en septiembre) y un máximo de 8.40 (E-1 y E-4, en secas), con valores muy similares (cerca de 8.2 en todas las muestras superficiales, excepto en E-5 con un promedio de 8.05 unidades); que indican calidad del agua adecuada para el riego agrícola, ya que los datos fisicoquímicos cumplen con los límites permisibles establecidos por los Criterios Ecológicos (CCE-CCA-001-1989, CECA) para el uso de Riego Agrícola (4.5–9 unidades). El pH alcalino sugiere una productividad primaria intermedia con producción alta de oxígeno disuelto, como se aprecia en los sitios E1 y E4 (Figura 5.4.3).



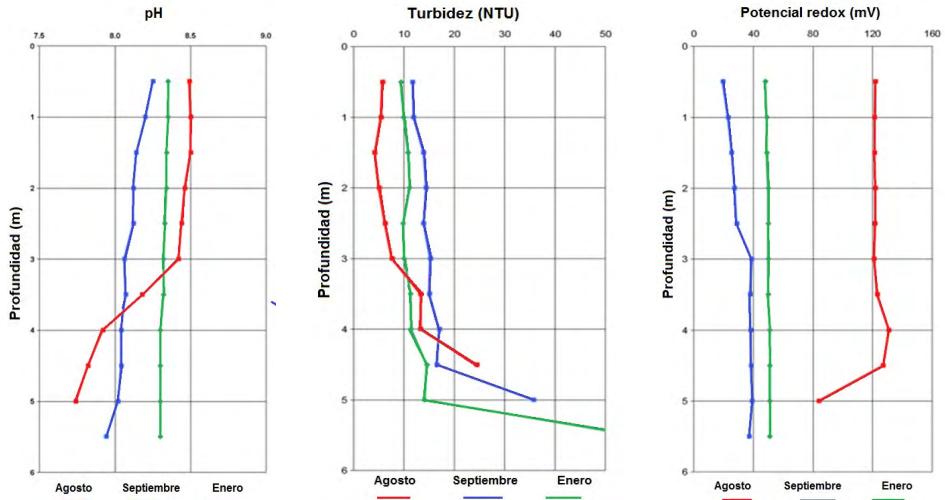


Figura 5.4.3. Perfiles verticales de temperatura, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto, ph, turbidez y potencial de óxido reducción (ORP) en la estación E-2 centro, durante los meses de agosto, septiembre (lluvias) y enero (secas), Laguna de Tuxpán, Gro. (modificada de IMTA 2013).

La conductividad eléctrica osciló entre 421 y 445 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valores que indican una mineralización adecuada; en la superficie los valores fueron muy similares y siguen una tendencia de mayor a menor de acuerdo con el orden de los puntos E-1 a E-5. Todos los valores cumplen con el límite establecido por el CECA (LMP = 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, RA).

La transparencia al disco de Secchi tuvo un promedio de 0.59 m, con el mínimo de 0.50 en septiembre en el punto E-1 y el máximo de 0.77 en enero en E-5. La Turbidez varía de 5.6 a 24.9, promediando 12.3 NTU, siendo más altos en E-1 (promedio de 17 NTU). En contraste, el valor es 8.4 veces mayor en E-2 fondo, promediando 104 NTU debido a la resuspensión de sedimento en el momento de tomar la muestra.

Todos los valores de SST están debajo del límite establecido por los CECA (RA, LMP = 50 mg/L), y van de 12.5 (E-4, septiembre) a 17.2 mg/L (E-3, enero). En el punto E-2 fondo, la concentración fue dos veces más alta en septiembre, con 38.7 mg/L (Figura 5.4.4 y 5.4.5). Acorde a la clasificación de las Metas de Calidad del Agua (CONAGUA 2005), este último valor califica al lago con una Buena Calidad; los puntos restantes con una calidad denominada Excelente.

La alcalinidad expresa la capacidad que tiene el agua de mantener el pH a pesar de recibir soluciones ácidas o alcalinas. En general, está compuesta por bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, además de boratos, fosfatos, silicatos y sustancias orgánicas. Expresada como CaCO_3 , en aguas naturales no rebasa los 500 mg/L. Las aguas duras presentan un intervalo de 120 a 180 mg/L y las aguas blandas entre 31 a 120 mg/L. Las aguas blandas se pueden usar para riego, abrevadero y protección de la vida acuática. Cuando la dureza es mayor a 500 mg/L no se recomiendan para uso doméstico e industrial, ya que provoca incrustaciones en tuberías (McNeely et al. 1979). En el lago, los valores oscilaron entre 132 y 161 mg/L (media de 146 mg/L), siendo mayor en E-5, con 148 y E-2 fondo con 147 mg/L. Todos los valores cumplieron con el límite permisible establecido por los CECA, para Uso Público Urbano (UPU, LMP = 400 mg/L). Por lo tanto, durante la época de lluvia, los valores de dureza total detectados en la superficie fue característica de agua blanda, con una variación de 114 (E-4) a 120 mg/L (E-3); en contraste, durante la época de secas se tuvieron valores superficiales entre 132 y 140 mg/L, que se clasifican como aguas duras. En E-2 fondo se presentaron valores más altos durante el primer muestreo (124 en lluvias y 132 mg/L en estiaje). Los sulfatos fueron relativamente bajos y no rebasan los CECA.

La DBO_5 osciló entre 0.82 en E-4 y 12.6 mg/L en E-3 en septiembre. De acuerdo a las Metas de Calidad del Agua (CONAGUA 2005), el agua se puede clasificar como de excelente calidad en E-4 y E-2, con valores promedio de 1.00 y 2.12 mg/L, respectivamente. Todos los datos de secas se clasificaron como excelentes; pero en el mes de septiembre se registró la categoría de buena calidad en E-5, con 5.88 mg/L. Hubo tres valores de calidad aceptable con 6.1 en E-1, 9.3 en E-2 y 12.6 mg/L en E-3 (Figura 5.4.5).

Todos los valores de la DQO₅, clasificaron como “aceptable” y “buena calidad” (17.4 a 33.9 mg/L), solo uno como “contaminado”, con 54.8 mg/L. En septiembre los valores fueron mayores que en estiaje, excepto en E-1, debido al efecto de la lluvia y los aportes de materia orgánica y otros contaminantes por las descargas puntuales y no puntuales de agua residual doméstica, urbana, turística y agropecuaria (Figura 5.4.5).

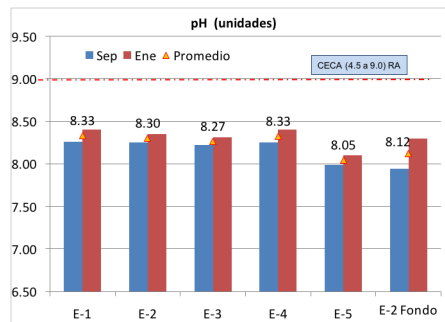
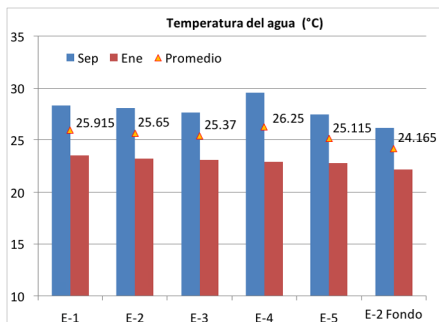
Las Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM) son un índice de la concentración de detergentes en el agua. Su presencia está acompañada del fósforo producido por las descargas urbanas y por el lavado de ropa dentro del lago. Sus valores estuvieron por debajo del límite establecido por los CECA (PVA, LMP = 0.1 mg/L), de 0 en secas a 0.096 mg/L en E-2 en lluvias, impacto que coincide con el sitio E-5 (lavaderos del Norte y Este del lago; Figura 5.4.5).

Las grasas y aceites (GyA) afectan la transferencia de gases en las interfaces agua-aire y sólidos-agua, de tal manera que interfieren con el intercambio de oxígeno en las branquias, sofocando a los peces y causando su muerte, y en los procesos fotosintéticos, interfiriendo con la alimentación de los herbívoros (McNeely et al. 1979). Las GyA presentaron valores bajos en septiembre. En cambio, para el mes de enero (estiaje) se reportaron tres puntos de muestreo por arriba de los 30 mg/L en E-3, con 42.2, E-5 con 39.3 y E-1 con 33.4 mg/L, respectivamente, valores que se explican por el abatimiento del volumen debido a la evaporación en la época de secas, lo que concentra las sustancias químicas industriales y domésticas. Por lo tanto, en secas y en esas zonas se puede presentar estrés para el desarrollo de la vida acuática (Figura 5.4.5).

Los fosfatos totales mostraron valores altos en septiembre. En superficie oscilaron entre 0.020 en E-1, a 0.210 mg/L en E-2, y un promedio de 0.101 mg/L (Figura 5.4.6). Los valores mayores se presentaron en el fondo (E-2) con una concentración ocho veces más alta que el promedio general en superficie (0.860 mg/L). Excepto en E-1, las muestras no cumplen con el límite establecido por los CECA para PVA (0.025 mg/L) para lagos y embalses. Por su parte, los valores de fósforo total (P-total), presentaron la misma tendencia (Figura 5.5.7). El promedio de P-total fue de 0.056 mg/L. El P-total no está considerado en los LMP en los Criterios Ecológicos (CCE-CCA-001-1989).

El nitrógeno amoniacal ($N-NH_3$) es la forma reducida de los compuestos nitrogenados. Presentó un promedio de 0.37 mg/L con los valores altos en las muestras E-3 con 0.410 y E-5 con 0.408 mg/L de $N-NH_3$. El mínimo de 0.159 se obtuvo en E-2 en septiembre, y el máximo de 0.577 mg/L en E-5 en enero. Todas los puntos rebasan por mucho el límite establecido por los CECA para PVA (LMP = 0.06 mg/L, Figura 5.5.7). El nitrógeno orgánico destaca como el más abundante de los compuestos nitrogenados y, junto con otros elementos, forma parte del nitrógeno total. En el lago las formas de nitrógeno tuvieron la siguiente relación: $N-org > N-NH_3 > N-NO_3 > N-NO_2$. La Figura 5.4.6 muestra el comportamiento de los promedios de N-org, que osciló entre 0.624, en E-1, y 1.400 mg/L en E-2, fondo.

El N-total repite el comportamiento ya descrito con el N-org. Sus valores se incrementan con relación a los aportes del río El Tomatal y del poblado de Tuxpan. La concentración promedio va de 1.112 a 1.754 mg/L en la capa superficial del lago. El promedio de N-total fue de 1.493 mg/L en la estación E-2 fondo, de la misma manera que el P-total, cuyo promedio más alto fue de 1.829 mg/L. Los CECA no definen un límite permisible para N-total. Se reportan los valores más altos en E-5, con 1.754 y E-3, con 1.537 mg/L, lo que sugiere su aporte a través de las escorrentías en las zonas cercanas al poblado de Tuxpan, y debido a la actividad agropecuaria.



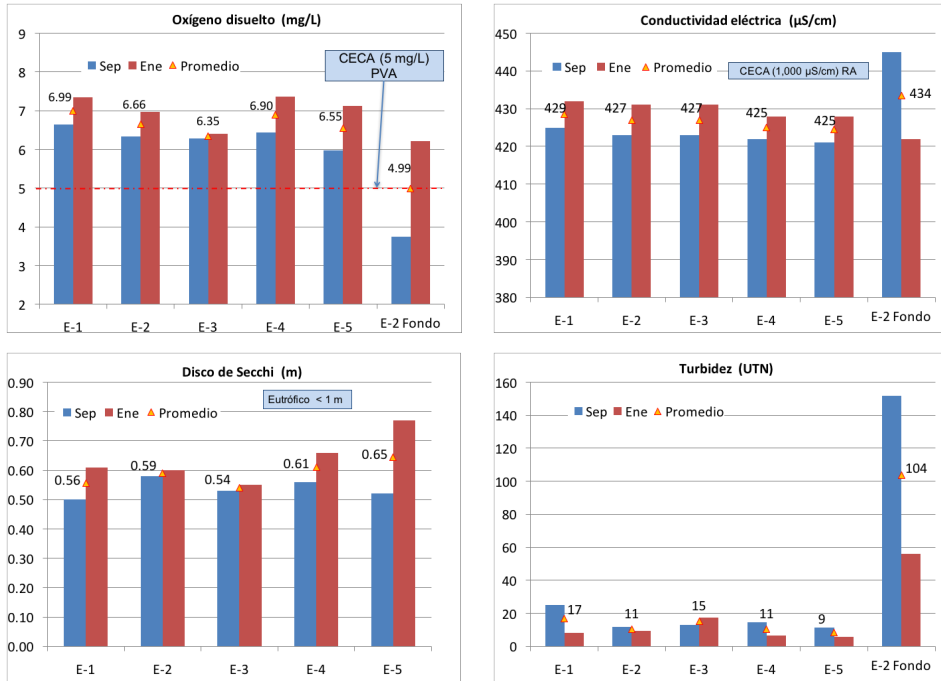
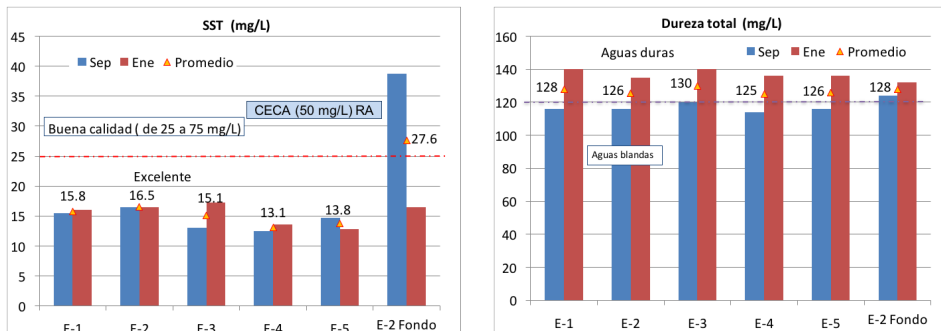


Figura 5.4.4. Resultados de temperatura del agua, potencial de hidrógeno, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, disco de secchi y turbidez en la Laguna de Tuxpan, Gro (modificada de IMTA 2013).



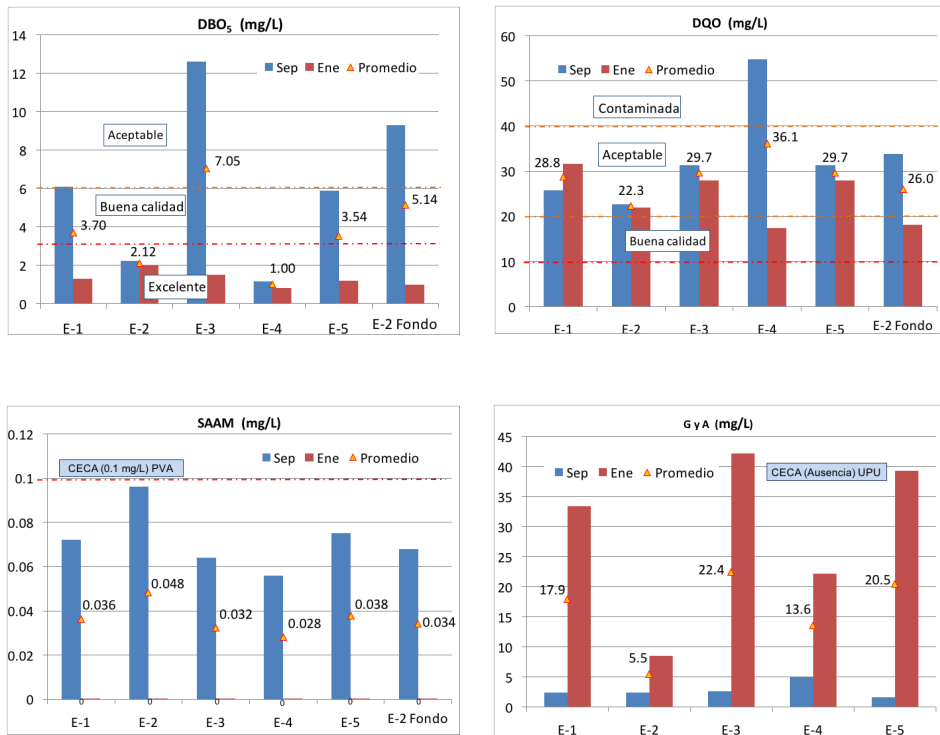


Figura 5.4.5. Resultados de sólidos suspendidos totales (SST), dureza total, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), SAAM, grasas y aceites en la Laguna de Tuxpan, Gro. (modificada de IMTA 2013).

Las coliformes totales presentaron 4×10^3 NMP/100 mL en E-1 y E-2 en enero, y 1.10×10^3 NMP/100 mL en E-2 fondo en septiembre. En la parte superficial del lago las muestras más contaminadas por estas bacterias fueron los puntos E-5, E-3 y E-1, con promedios de 350, 277 y 122 NMP/100 mL, respectivamente.

Las coliformes fecales indican una buena calidad del agua en las muestras de superficie, con una variación > 3 (para los puntos E-2, E-3 y E-5, en secas) con 2.4×10^2 NMP/100 mL (E-1 en septiembre). Este último valor rebasa el límite de los CECA para la PVA (LMP = 200 NMP/100 mL). Por último la estación E-2 fondo

con un valor en septiembre de 1.10×10^3 NMP/100 mL, rebasa el límite de CECA para la PVA y los límites de CECA para RA y UPU (LMP = 1,000 NMP/100 mL). No se detectó una alta contaminación para las muestras E-5 y E-3, como sucedió con los coliformes totales.



Figura 5.4.6. Resultados de fósforo total, nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico, nitrógeno total, coliformes totales y coliformes fecales en la Laguna de Tuxpan, Gro. (modificada de IMTA 2013).

5.4.4 Evaluación del estado trófico

El fósforo total presentó un promedio de 0.056, y el nitrógeno total de 1.493 mg/L para todo el lago. Los dos valores caen dentro de los límites meso-eutrófico para lagos cálidos tropicales. Sin embargo, los valores superficiales de fósforo total se ubican muy cercanos a una condición de mesotrofia con un rango de variación de 0.009 a 0.070 mg/L. El Cuadro 5.4.2 muestra los límites de estado trófico reportados por diferentes autores y basados en varios cuerpos de agua alrededor del mundo.

Cuadro 5.4.2. Límites tróficos para lagos y embalses. O-M, transición entre oligo y mesotrófico; M-E, transición entre meso y eutrófico; E-H, transición entre eutrófico e hipertrofico

Parámetro	Límites 1/			Comentarios	Referencia
	O-M	M-E	E-H		
Fósforo total (mg/L)	0.010	0.030	0.100	1/	Nürnberg, 1996
	0.030	0.070	--	2/ 3/	Salas y Martino, 1991
Nitrógeno total (mg/L)	0.350	0.650	1.200	1/	
	0.661	0.753	1.875	2/	OECD, 1982, En: Ryding y Rast, 1989
Disco de Secchi	4	2	1	1/	

1/ Valor epilimnético de verano; 2/ Valor promedio anual

3/ Datos provenientes del proyecto de lagos cálidos tropicales americanos.

Modificada de IMTA 2013.

En contraste, el disco de Secchi con un promedio de 0.59 m, menor al límite de 1 m, sugiere un estado de eutrofia-hipertrofia. Estos valores tan bajos pueden explicarse por un importante aporte de sedimentos del río Tomatal, y probablemente por la resuspensión de sedimentos por la acción del viento dada la profundidad relativamente baja del lago (media de 4.59 m).

Los valores del Índice de Estado trófico (IET, Carlson, 1977), están en una escala de 0 a 100; un valor alto corresponde a un nivel trófico mayor, o mayor contenido de materia orgánica. Para valores de 40 a 55 unidades se considera como

mesotrófico, y mayor a 55 de eutrófico. Con un IET de 63.4 unidades promedio la Laguna de Tuxpan se considera eutrófica, aún cuando el fósforo total y el nitrógeno total fueron ligeramente más bajos (62.2 y 60.2 unidades, respectivamente), no así el valor obtenido para el disco de Secchi (67.6 unidades). Se aprecia que los criterios del Índice de Estado Trófico de Carlson son más estrictos que los límites establecidos para lagos cálidos tropicales (Cuadro 5.4.3).

Cuadro 5.4.3. Resultados promedio y del índice de estado trófico de la Laguna de Tuxpan, Gro.
(modificada de IMTA 2013)

Parámetro	Valor promedio	Resultados del IET
Fósforo total (mg/L)	0.056	62.2
Nitrógeno total (mg/L)	1.493	60.2
Disco de Secchi (m)	0.59	67.6

Fuente: Modificada de IMTA 2013.

5.5. DISCUSIÓN

Se observa una tendencia hacia el decremento continuo de la profundidad en la zona donde ingresa el río El Tomatal al lago (profundidad promedio 2.0 m), debido a que este afluente aporta y acumula sedimentos, lo que ha originado una pérdida de la capacidad de la cubeta en el tiempo deteriorando las condiciones para el desarrollo de la flora y fauna nativas (Proff et al. 2009).

La poca variación en los perfiles verticales de temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales en todos los puntos monitoreados, indica que el lago circula en forma continua en toda la columna de agua (holomixis), lo que resulta en un cuerpo de agua homogéneo en lluvias y secas, con ausencia de una termoclina. Esto es consistente con la baja profundidad del lago, lo cual no permite una diferenciación térmica en epilimnio e hipolimnio (Wetzel 1983). Es necesario el muestreo en primavera y otoño para conocer el comportamiento térmico anual. Sin embargo, en el fondo muestra un comportamiento diferente.

Las muestras del sitio E-2 fondo, zona más profunda, contuvieron bajas cantidades de oxígeno disuelto, pero altas de turbidez, SST, P-total, N-NH₃, N-org, N-total, coliformes fecales y DBO₅, que lo caracterizan como de mala calidad del agua respecto a las muestras superficiales, y que se explica por la acumulación en el sedimento de materia orgánica y basura proveniente del El Tomatal y de las actividades de la población (lavado de ropa) y escorrentías (actividad agropecuaria), que colocan al lago dentro de los límites para el desarrollo de la vida acuática (Lamper y Sommer 1997). Por su lado, la mayor temperatura, pH, conductividad eléctrica y sulfatos en varios puntos del lago, son consecuencia de la evaporación debido a su mayor superficie de exposición a la insolación.

El pH en superficie por arriba de las 7.55 unidades y ligeramente mayores, concuerda con una mayor productividad primaria en la zona fótica (Margalef 1983). El potencial Redox, señaló condiciones favorables para la respiración aerobia en la columna de agua y un entorno adecuado para el desarrollo de

la vida acuática. Sin embargo en la estación E-5 en el fondo del lago, los valores negativos pueden provocar una baja de oxígeno disuelto en la columna de agua y con ello generar condiciones de estrés para los peces, o generar condiciones de descomposición anaerobia en el sedimento del lago (Wetzel 2001).

Los valores bajos del disco de Secchi indican una alta cantidad de sólidos suspendidos y la presencia de algas, así como el impacto de las actividades antropogénicas cercanas al cuerpo de agua. Por el comportamiento de los nutrientes y el disco de Secchi y de acuerdo con los límites de lagos cálidos, el lago se puede clasificar como mesotrófico - eutrófico y de acuerdo con la evaluación del Índice de Estado Trófico, el lago es eutrófico. La entrada de sólidos y nutrientes puede ser explicada por las escorrentías en la época de lluvias y por los aportes a través del río El Tomatal. Los resultados de coliformes fecales en el lago, indican una posible contaminación por descargas de aguas residuales provenientes del poblado de Tuxpan, así como actividades de lavado de ropa, presencia de ganado y de restaurantes a la orilla norte del lago.

En el lago se obtuvo una proporción de N:P de 26.8, por lo tanto, se deduce que el nutriente limitante en este sistema es el fósforo ($N:P > 9$), según el criterio de lagos cálidos tropicales donde se reporta una relación balanceada de N:P de 9:1 (Margalef 1983).

5.6 CONCLUSIONES

El lago “Laguna de Tuxpan” es un cuerpo de agua cálido tropical somero, ubicado a una altitud de 749 m.s.n.m., con una profundidad máxima de 7.86 m y profundidad media de 4.59 m. El cuerpo de agua se clasifica como un cuerpo de agua cálido tropical somero, que presenta una ligera turbidez provocada por la concentración de sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales en la columna de agua. De acuerdo a los monitoreos realizados a la fecha, el lago se clasifica según Hutchinson (1957), como un cuerpo de agua cálido holomíctico, que significa una columna del agua con una sola calidad de agua.

Las características fisicoquímicas y biológicas indican que el lago experimenta una creciente influencia antropogénica, caracterizada por el vertido de aguas residuales y aporte de detergentes por lavaderos ubicados dentro del cuerpo de agua, así como deforestación y erosión de la subcuenca. El lago presenta condiciones de estrés ambiental en algunos puntos para el oxígeno disuelto y potencial redox. El pH en el lago tuvo valores alcalinos, que sugieren una productividad primaria intermedia y una leve generación de oxígeno disuelto en la superficie del lago. Los valores de oxígeno disuelto superficiales en el lago cumplen con el límite máximo permitido por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua para la protección a la vida acuática (PVA). La materia orgánica en el lago, obtenida por medio de los niveles de DBO_5 , se ubica con una clasificación de buena calidad a aceptable de acuerdo a las Metas de Calidad del Agua. La DQO presenta un mayor nivel de contaminación con una clasificación de buena calidad, aceptable y contaminada (septiembre). La dureza total en el lago, va de aguas blandas a aguas ligeramente duras, los mayores valores en la época de secas. Las grasas y aceites detectaron grandes variaciones en secas, por lo mismo algunas zonas se puede presentar estrés para el desarrollo de la vida acuática en el sistema.

Los parámetros que no cumplieron con los límites establecidos por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001-1989) para la PVA para algún punto fueron: los fosfatos totales, el nitrógeno amoniacal y los coliformes fecales.

En contraste, los parámetros que sí cumplieron con los Criterios Ecológicos para la PVA fueron: el oxígeno disuelto, cloruros, nitrógeno de nitratos y SAAM. Los valores promedio de fósforo total y nitrógeno indican que el nutriente limitante en este sistema es el fósforo.

El fósforo total, nitrógeno total y el disco de Secchi muestran una alta probabilidad de que, de acuerdo con los límites de lagos cálidos tropicales, el lago sea mesotrófico – eutrófico. De acuerdo con la evaluación del Índice de Estado Trófico (IET) el lago se clasificó como eutrófico con un valor promedio de 63.4 unidades. Por el grado de contaminación del río Tomatal, así como las diversas actividades antropogénicas cercanas al lago, morfometría y color del agua, se estima que el nivel de eutrofización del lago va en aumento. La transparencia del disco de Secchi fue de 0.59 m, este valor fue relativamente bajo y sugiere un alto aporte de sólidos provenientes de la subcuenca, la presencia de fitoplancton, así como el impacto de las actividades antropogénicas cercanas al cuerpo de agua. La entrada de sólidos y nutrientes puede ser explicada por las escorrentías en la época de lluvias y por los aportes a través del río El Tomatal; otros usos secundarios que pueden contribuir con la contaminación del cuerpo de agua son: el lavado de ropa, las actividades de los restaurantes a la orilla del lago y el uso del cuerpo de agua como abrevadero de ganado, todas ellas ubicadas en las márgenes del lago.

5.7 REFERENCIAS

- BRAVO-INCLÁN, L., OLVERA-VIASCÁN, V., P. SALDAÑA-FABELA, J.J. SÁNCHEZ-CHÁVEZ,** y A.C. TOMASINI-ORTIZ, 2011. Trophic state assessment in warm-water tropical lakes and reservoirs of the central region of Mexico. p. 194-203. In: van Bochove, E., Vanrolleghem, P.A., Chambers, P.A., Thériault, G., Novotna, B. and M.R. Burkart (eds.), 2011. *Issues and Solutions to Diffuse Pollution: Selected Papers*. 14th International Conference of the IWA Diffuse Pollution Specialist Group, DIPCON 2010. Conférence sur la pollution diffuse 2010 inc. IWA, OECD. Québec, Canada. 495 pp.
- CARLSON, R.E., 1977.** A Trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 22: 361-369.
- CASTAGNINO, W.A., 1982.** *Investigación de modelos simplificados de eutroficación en lagos tropicales. Reporte técnico.* World Health Organization (WHO)/Pan American Health Organization (PAHO)/Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Science (CEPIS). Perú, 27 pp.
- CE-CCA-001/89.** *Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua.* Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT.
- CHACÓN-TORRES A. y C. ROSAS-MONGE, 1998.** Water quality characteristics of a high altitude oligotrophic Mexican Lake. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 1(3-4): 237-244.
- CONAGUA, 2005.** *Comunicación personal. Subgerencia de Estudios de Calidad del Agua e Impacto Ambiental.* Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua.
- COOKE, G.D., E.B. WELCH, S.A. PETERSON Y S.A. NICHOLS, 2005.** *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs.* CRC/Lewis, tercera edición. Boca Ratón. 591 pp.
- DEL CASTILLO, J.M. 1992.** *Morfometría de lagos. Una aplicación a los lagos del Pirineo.* Tesis de Doctorado. Universidad de Barcelona. España. 251 p.
- ESRI 2011.** *ArcGIS Desktop: Release 10.* Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- GONZÁLEZ MATEOS, R., VOLKE HALLER, V., GONZÁLEZ R.J., OCAMPO P.M., ORTIZ S.C., MANZO R.F. 2007.** Efecto de la erosión del suelo sobre el rendimiento de maíz de temporal. *Terra Latinoamericana*, 25(4): 399-408.
- HOLDREN, C., JONES, W. y J. TAGGART, 2001.** *Managing Lakes and Reservoirs.* North Am. Lake Manage. Soc. And Terrene Inst., in cooperation with the Office of Water Assessment Watershed Protection Division. U.S. Environmental Protection Agency. Madison, Wisconsin.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. 2013.** *Estudio para la Identificación de las Causas Niveles y Grado de Contaminación Ambiental en la Laguna de Tuxpan, Guerrero y*

-
- Propuestas para el Tratamiento de las Aguas Residuales Descargadas en Ella y sus Afluentes. IMTA-CAPASEG. Informe Final. Tomo I. Convenio CCE.01.04.3.0.2013.-0231. México.
- LAMPERT, W. y SOMMER, U. 1997. *Limnoecology*. Oxford University Press. USA.
- LIND O. T., DOYLE R., VODOPOVICH, D. S., TROTTER B. T., LIMÓN J.G., DÁVALOS-LIND, L., 1992. Clay turbidity: Regulation of phytoplankton production in a large, nutrient rich tropical lake. *Limnology and Oceanography*, 37(3): 549-565.
- MARGALEF, R., 1983. *Limnología*. Ed. Omega. Barcelona.
- MCNEELY, R.N., NEIMANIS, V.P., AND DWYER, L. 1979. *Water Quality Sourcebook. A Guide to Water Quality Parametrsers*. Inland Waters Directorate. Water Quality Branch. Ottawa.
- NORMA MEXICANA NMX-AA-014-1980, *Cuerpos receptores-Muestreo*, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México, D.F. 5 de septiembre de 1980.
- NÜRNBERG G. K., 1996. Trophic state of clear and colored, soft- and hardwater lakes with special consideration of nutrients, anoxia, phytoplankton & fish. *Lake and Reserv Manage* 12(4): 432-447.
- OLVERA-VIASCÁN V., BRAVO-INCLÁN L. Y SÁNCHEZ-CHÁVEZ J., 1998. Aquatic Ecology and Management Assessment in Valle de Bravo Reservoir and its Watershed. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 1(3-4): 277-290.
- POFF, N.L., B.D. RICHTER, A.H. ARTHINGTON, S. BUNN, R.J. NAIMAN, E. KENDY, M. ACREMAN, C. APSE, B.P. BLEDSOE, M.C. FREEMAN, J. HENRIKSEN, R.B. JACOBSON, J.G. KENNEN, D.M. MERRITT, J.H. O'KEEFEE, J.D. OLDEN, K. ROGERS, R.E. THARME Y A. WARNER (2009). "The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards". *Freshwater Biology*.
- SALAS H. J. Y MARTINO P., 1991. A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. *Water Research*, 25(3), 341-350.
- WETZEL, R.G., 2001. *Limnology*. Lake and River Ecosystem. 3th. Edition. Academic Press. USA.



“Plancton”

EDITORES:

Alfonso G. Banderas T.
Rebeca González-Villela.
Alejandro J. Ruíz López.

CONTENIDO

Capítulo 6

6.1 INTRODUCCIÓN	210
6.2 ÁREA DE ESTUDIO	213
6.3 MÉTODOS	213
6.4 RESULTADOS	215
6.4.1. Algas y fitoplancton	219
6.4.1.1. <i>Chroococcus</i> sp. ó <i>Merismopedia</i> sp. (Bourelly, 1970)	219
6.4.1.2. <i>Gomphosphaeria</i> sp. (Kützing, F.T. 1836).	220
6.4.1.3. <i>Microcystis</i> sp.	221
6.4.1.4. <i>Gleocapsa punctata</i> (Nägeli 1879)	222
6.4.1.5. <i>Pediastrum simplex</i> (Meyen 1829)	224
6.4.1.6. <i>Pediastrum duplex</i> (Meyen 1829)	224
6.4.1.7. <i>Ceratium furca</i> (Ehrenberg) Claparède & Lachmann 1859.	226
6.4.1.8. <i>Ceratium lineatum</i> (Ehrenberg) Cleve 1899	227
6.4.1.9. <i>Ceratium hirundinella</i> (O.F.Müller) Dujardin 1841	228
6.4.1.10. <i>Peridinium ovatoides</i> o <i>Peridinium cinctum</i> (O.F.Müller) Ehrenberg.	229
6.4.1.11. <i>Melosira</i> sp. (C. Agardh, 1824)	231
6.4.2. Zooplancton	232
6.4.2.1. <i>Trachelomonas</i> sp. (Ehrenberg, 1835).	232
6.4.2.2. <i>Brachionus havanaensis</i> (Rousselet).	232
6.4.2.3. <i>Bosmina longirostris</i>	233
6.4.2.4. <i>Diaphanasoma birgei</i> (Korinek 1981)	235
6.4.2.5. <i>Keratella cochlearis</i>	236
6.4.2.6. <i>Cyclops</i> sp.	237
6.4.2.7. <i>Limnocalanus macrurus</i> (G. O. Sars, 1863).	238
6.5 CONCLUSIONES	240
6.6. REFERENCIAS	243

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 6.3.1. <i>Ubicación de puntos de muestreo en la Laguna de Tuxpan.</i>	213
Figura 6.4.1. <i>Distribución porcentual de las divisiones algales por estación de muestreo (primer muestreo).</i>	217
Figura 6.4.2. <i>Distribución porcentual de las divisiones algales por estación de muestreo (segundo muestreo).</i>	217

ÍNDICE DE TABLAS

Figura 6.4.1. <i>Distribución porcentual de las divisiones algales por estación de muestreo (primer muestreo)</i>	215
Figura 6.4.2. <i>Distribución porcentual de las divisiones algales por estación de muestreo (segundo muestreo)</i>	217

ANEXOS

Anexo 1 <i>“Plancton”</i>	245
----------------------------------	-----

6.1 INTRODUCCIÓN

Los términos zoo y fitoplancton se refieren a la comunidad de microorganismos, en su mayoría fotosintéticos, (microalgas, cianobacterias, flagelados heterótrofos y otros grupos sin clorofila), así como protozoarios, crustáceos y larvas de peces y de otros organismos, que vive suspendida en la masa de agua de lagos, ríos y el mar.

Las algas fitoplanctónicas son organismos microscópicos autótrofos, que sintetizan sus propios alimentos mediante pigmentos fotosintéticos, como la clorofila a y otros pigmentos accesorios. Usan la luz como fuente de energía para convertir el bióxido de carbono atmosférico en carbohidratos. Durante este proceso liberan oxígeno molecular como subproducto de la fotosíntesis. Presentan gran variedad de formas (esféricas, cilíndricas, espirales, triangulares, cuadradas, poliédricas); niveles de organización (monadoide –unicelular-, cenobial –agregado-, colonial, filamentoso y pseudoparenquimatoso); y formas de vida (plancton, bentos y perifiton). A pesar de su tamaño, son las principales productoras de materia orgánica en los ambientes de agua dulce (Bourelly 1970).

La composición y abundancia del fitoplancton en los lagos depende de las condiciones físicas e hidrológicas del ambiente acuático como la luz, la temperatura, la turbulencia –o estabilidad del agua-, tiempo de residencia del agua –o retención hidráulico- y la propia tasa de sedimentación del plancton; así como de la composición química del agua (nutrientes y materia orgánica), la mineralización (compuestos de proporcionalidad variable), pH, oligoelementos; y de otros factores biológicos como la depredación, por parte de organismos filtradores planctónicos (zooplancton y peces) y las relaciones entre especies (competencia y efectos alelopáticos o toxicidad inducida por algunas especies). También el parasitismo fúngico (infecciones inducidas por hongos y cromistas –heterótrofos flagelados capaces de reducir densas poblaciones fitoplanctónicas-), sin mencionar relaciones como simbiosis, comensalismo y otras.

El fitoplancton se usa como indicador del estado trófico de los cuerpos de agua y para la detección y seguimiento de las restricciones fisicoquímicas para los organismos relacionadas con la contaminación térmica, los cambios en la mineralización del agua (y en la composición de los iones mayoritarios disueltos), la eutrofización (altas concentraciones de nitrógeno y fósforo y, en ocasiones, de sílice y otros cationes como el hierro) y la contaminación orgánica (soluble y particulada). El fitoplancton es un indicador de las presiones hidromorfológicas que determinan cambios en la tasa de renovación de lagos y embalses (Vicente et al. 2005)

Por lo general, las algas planctónicas son capaces de indicar la calidad del agua gracias a sus tiempos de generación rápida y su sensibilidad a los cambios del ambiente, constituyendo referentes de su estado ecológico. Es característica su capacidad depuradora del ambiente transformando nutrientes del medio a través de la fotosíntesis, proceso que involucra la liberación de oxígeno al ambiente, el cual favorece la oxidación de la materia orgánica, por un lado, y por el otro aumenta el oxígeno disuelto en el agua, el cual es utilizado en la respiración de las otras comunidades u organismos que componen la flora y fauna del ecosistema acuático donde viven.

A partir del análisis conjunto de la estructura y el funcionamiento de la comunidad algal y otras propiedades de tipo físico-químico, microbiológicas e hidráulicas, tales como velocidad y dirección de las corrientes, el caudal, la transparencia del agua, el pH (acidez), el oxígeno disuelto, la temperatura y la conductividad, se puede determinar el estado de salud o condición ecológica del cuerpo de agua. Este análisis determina el “status” ecológico de cada especie algal lo que a su vez provee de información sobre “la salud biológica del ecosistema”. En términos generales, se considera que cuanto mayor es la diversidad de especies presentes en el medio, las aguas son de mejor calidad, aunque se deben tener en cuenta otras variables, como por ejemplo el nivel de nutrientes y minerales. El estudio de la biología de las algas, principalmente de su anatomía, puede indicar la presencia de factores adversos a su crecimiento y desarrollo, tal como lo son los metales pesados, los que provocan malformaciones celulares en casi todas las especies, o la desaparición de muchas de ellas (Luján 2013).

Por ser productores de materia viva, son la base de la red trófica, por lo que el fitoplancton se considera un elemento de calidad principal para el establecimiento del estado ecológico de los lagos. Por lo tanto, la recopilación de la información de la composición y estructura de la comunidad fitoplanctónica y su relación con los factores fisicoquímicos obtenidos en los muestreos de campo en la Laguna de Tuxpan, Gro., proporcionará la información sobre el estado de salud del ecosistema lacustre.

6.2 ÁREA DE ESTUDIO

La Laguna de Tuxpan es un lago de origen tectónico ubicado entre los paralelos 18°13" y 18°27" de latitud Norte y entre los 99°29" y 99°42" de longitud Oeste.

6.3 MÉTODOS

Se efectuaron dos campañas de muestreos en lluvias y estiaje, con el objetivo de conocer las diferencias que se presentan entre ambas estaciones (Anexo 1). Para seleccionar la ubicación de los sitios de muestreo (estaciones) se consideraron la morfología de la cubeta, la profundidad, la influencia de los afluentes, la cobertura de vegetación acuática y los vertidos puntuales, eligiendo cinco puntos de muestreo de superficie dentro del lago. Solo en uno de ellos se tomaron muestras de superficie y fondo (Figura 6.4.1). En cada punto se hizo un arrastre con red de plancton durante 3 min, se fijó una porción con formol al 4% para la identificación, y otra con lugol para la enumeración y conteo del plancton. Adicionalmente, se tomó la muestra del agua para el análisis de MC-LR (Microcistina), cuyos resultados se presentan en el Capítulo 8. También se obtuvieron muestras de clorofila a (Cl a) recolectando el agua con una botella Van Dorn. Las muestras se trasladaron al laboratorio a 4 °C protegidas de la luz.

Para la identificación taxonómica y el recuento de organismos, se observaron en el laboratorio en el microscopio de luz, con un aumento de 40x. Se colocó 1 mL de muestra en una celda Sedgwick-Rafter y se procedió a la identificación

y conteo, realizándose tres lecturas por cada control. El promedio se obtuvo dividiendo el número de organismos contados entre el número total de lecturas y se aplicó la fórmula de Lackey reportando los resultados como células/mL (APHA 2005).

El estudio de las comunidades del fitoplancton a través de las asociaciones de especies, para la caracterización del estado ecológico del lago, se efectuó utilizando los inventarios de especies y/o géneros y de sus patrones de variación de la composición.

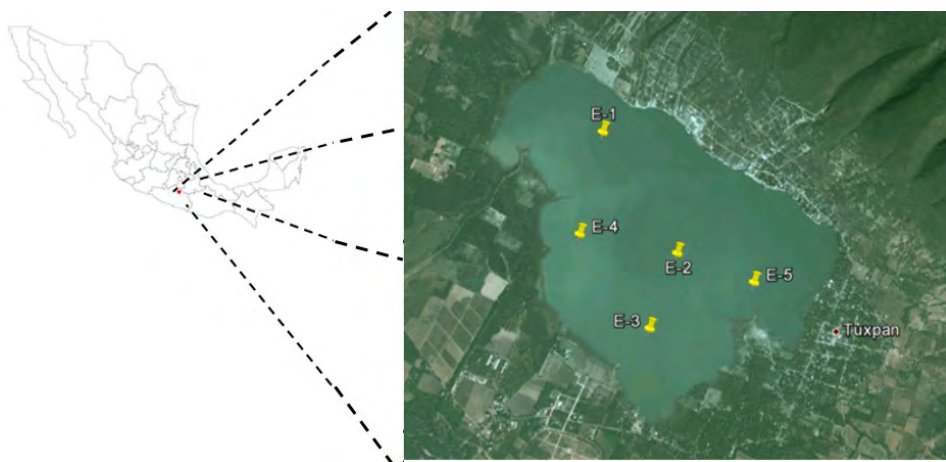


Figura 6.3.1 Ubicación de puntos de muestreo en la Laguna de Tuxpan.

Para la identificación de organismos planctónicos se utilizaron las claves y criterios morfológicos de Ward and Whipple (1945), Osorio (1942), Ortega (1984), González (1988), Pennak (1978) y Wikstead (1979). La clasificación de las algas se enlista en las Tablas 6.5.1 y 6.5.2. y en seguida se describe su ecología y forma de nutrición.

6.4 RESULTADOS

Las tablas 6.4.1 y 6.4.2 señalan que las condiciones ambientales imperantes durante el primer muestreo (septiembre 2013; Anexo 1), determinaron una mayor diversidad de especies pero con una cantidad menor de individuos por estación, cercana al 86% del segundo muestreo (secas). Este fenómeno define al estiaje como la época más propicia para el crecimiento del fitoplancton, pero con una menor diversidad y favoreciendo a ciertos taxa, especialmente a las Dinophyta, que en conjunto aportaron el 84% de la abundancia conjunta, mientras que en lluvias sólo fue del 44%. De la misma forma, las Figuras 6.4.1 y 6.4.2 muestran los cambios en los porcentajes de presencia de las Divisiones entre los muestreos, observándose que en el segundo muestreo la dominancia de las Dinophyta es abrumadora.

Tabla 6.4.1 Listado y dominancia de especies encontradas en el muestreo del mes de septiembre (lluvias) en la Laguna de Tuxpan, Gro.

División	Estación	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	TOTAL	
	Muestra	C-881-5	C-881-3	C-881-2	C-881-4	C-881-1		
Cyanobacteria	<i>Chroococcus</i> ó <i>Merismopedia</i>	18.869	4.717	14.152	----	943	38,681	
	<i>Gomphosphaeria</i> sp.	----	----	21.228	1.887	----	23.115	
	<i>Microcystis</i> sp.	----	11.793	23.587	8.491	9.906	53.777	
	<i>Gloeocapsa punctata</i>	30.663	30.663	----	----	----	61.326	
Chlorophyta	<i>Pediastrum simplex</i>	16.511	8.491	14.152	10.378	8.019	57.551	
	<i>Pediastrum duplex</i>	30.663	13.209	11.793	8.491	4.717	68.873	
Dinophyta	<i>Ceratium furca</i>	5.661	19.813	7.076	3.302	23.587	59.439	
	<i>Ceratium hirundinella</i>	----	----	7.076	----	94.435	101.511	
	<i>Ceratium lineatum</i>	2.248	18.869	11.793	5.661	4.246	69.817	
	<i>Peridinium ovatooides</i>	----	6.133	4.246	1.887	24.058	36324	
Euglenophyta	<i>Trachelomonas</i> sp.	7.076	2.359	1.415	2.359	22.172	35.381	
TOTAL	11	11	138.691	116.047	116.518	42.456	192.083	605795

DOMINANCIA ENTRE ESPECIES %							
Cyanobacteria	<i>Chroococcus</i> ó <i>Merismopedia</i>		13.6	4.1	12.1		0.5
	<i>Gomphosphaeria</i> sp.				18.2	4.4	
	<i>Microcystis</i> sp.			10.2	20.2	20.0	5.2
	<i>Gloeocapsa</i> <i>punctata</i>	22.1	26.4				
Chlorophyta	<i>Pediastrum</i> <i>simplex</i>	11.9	7.3	12.1	24.4	4.2	
	<i>Pediatrum</i> <i>duplex</i>	22.1	11.4	10.1	20.0	2.5	
Dinophyta	<i>Ceratium</i> <i>furca</i>	4.1	17.1	6.1	7.8	12.3	
	<i>Ceratium</i> <i>hirundinella</i>			6.1		49.2	
	<i>Ceratium</i> <i>lineatum</i>	21.1	16.3	10.1	13.3	2.2	
	<i>Peridinium</i> <i>ovatooides</i>		5.3	3.6	4.4	12.5	
Euglenophyta	<i>Trachelomonas</i> sp.	5.1	2.0	1.2	5.6	11.5	
TOTAL	11	11	100	100.1	99.8	99.9	100.1

DOMINANCIA DE LAS ESPECIES ENTRE ESTACIONES %							
Cyanobacteria	<i>Chroococcus</i> ó <i>Merismopedia</i>	100	48.8	12.2	36.6		2.4
	<i>Gomphosphaeria</i> sp.	100			91.8%	8.2	
	<i>Microcystis</i> sp.	100		21.9	43.9	15.8	18.4
	<i>G. punctata</i>	100	50.0	50.0			
Chlorophyta	<i>P. simplex</i>	100	28.7	14.8	24.6	18.0	13.9
	<i>P. duplex</i>	99.9	44.5	19.2	17.1	12.3	6.8
Dinophyta	<i>Ceratium furca</i>	100	9.5	33.3	11.9	5.6	39.7
	<i>C. hirundinella</i>	100			7.0		93.0
	<i>C. lineatum</i>	100	41.9	27.0	16.9	8.1	6.1
	<i>P. ovostris</i>	100		16.9	11.7	5.2	66.2
Euglenophyta	<i>Trachelomonas</i> sp.	100.1	20.0	6.7	4.0	6.7	62.7%

Tabla 6.4.2 Listado y dominancia de especies encontradas en el muestreo del mes de enero (secas) en la Laguna de Tuxpan, Gro.

Estación			E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	TOTAL
Muestra			C-881-5	C-881-3	C-881-2	C-881-4	C-881-1	
Cyanobacteria	<i>Microcystis</i>	sp.	4529	9746	7232	11322	7232	40061
Chlorophyta	<i>Pediastrum</i>	<i>duplex</i>	5972	12548	2830	9590	10062	41002
Dinophyta	<i>Ceratium</i>	<i>furca</i>	1887	0	0	20912	0	22799
	<i>Ceratium</i>	<i>hirundinella</i>	54250	100008	95573	90257	133029	473117
	<i>Peridinium</i>	sp.	4246	16039	12576	7387	40569	80817
	<i>Melosira</i>	<i>granulata</i>	2986	0	2986	3930	3302	13204
Euglenophyta	<i>Trachelomonas</i>	sp.	2830	5661	6288	14624	2359	31762
TOTAL	7	7	76700	144002	127485	158022	196553	702762

DOMINANCIA ENTRE ESPECIES %

Cyanobacteria	<i>Microcystis</i>	sp.	5.9	6.8	5.7	7.2	3.7
Chlorophyta	<i>Pediastrum</i>	<i>duplex</i>	7.8	8.7	2.2	6.1	5.1
Dinophyta	<i>Ceratium</i>	<i>furca</i>	2.5	0.0	0.0	13.2	0.0
	<i>Ceratium</i>	<i>hirundinella</i>	70.7	69.4	75.0	57.1	67.7
	<i>Peridinium</i>	sp.	5.5	11.1	9.9	4.7	20.6
	<i>Melosira</i>	<i>granulata</i>	3.9	0.0	2.3	2.5	1.7
Euglenophyta	<i>Trachelomonas</i>	sp.	3.7	3.9	4.9	9.3	1.2

DOMINANCIA ENTRE ESPECIES ENTRE ESTACIONES

Cyanobacteria	<i>Microcystis</i>	sp.	11.3	24.3	18.1	28.3	18.1
Chlorophyta	<i>Pediastrum</i>	<i>duplex</i>	14.6	30.6	6.9	23.4	24.5
Dinophyta	<i>Ceratium</i>	<i>furca</i>	8.3	0.0	0.0	91.7	0.0
	<i>Ceratium</i>	<i>hirundinella</i>	11.5	21.1	20.2	19.1	28.1
	<i>Peridinium</i>	sp.	5.3	19.8	15.6	9.1	50.2
	<i>Pyrocystis</i>	<i>noctiluca</i>	22.6	0.0	22.6	29.8	25.0
Euglenophyta	<i>Trachelomonas</i>	sp.	8.9	17.8	19.8	46.0	7.4

En el primer muestreo (lluvias) se registraron más especies debido al abundante arrastre de sedimentos y materia orgánica, a la dilución del cuerpo de agua efectuada por la lluvia y a una temperatura más alta. Esto es, al diluir las aguas del lago, la lluvia mueve al cuerpo de agua hacia un estado mesotrófico que, en general, corresponde al grado trófico de mayor biodiversidad, misma que disminuye cuando el lago regresa al estado eutrófico en temporada de secas, debido a la evaporación y aumento en la concentración de solutos, corroborado por la presencia de *Trachelomonas* sp. en la estación 4, género frecuente en aguas ricas en hierro.

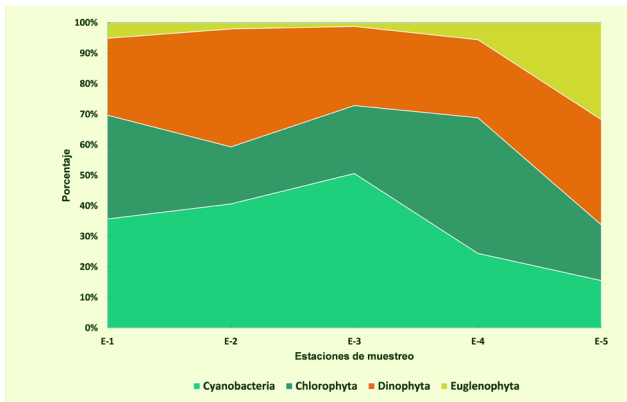


Figura 6.4.1 Distribución porcentual de las divisiones algales por estación de muestreo (primer muestreo).

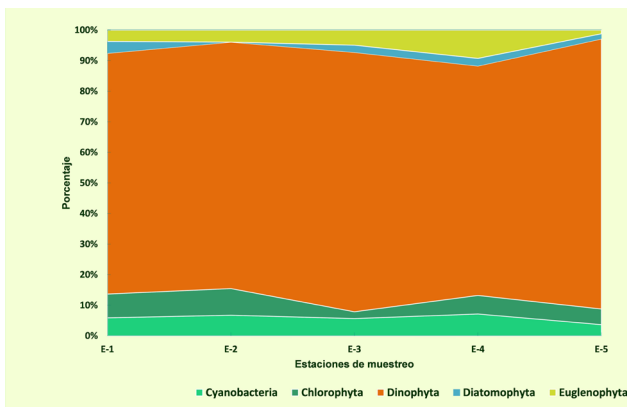


Figura 6.4.2 Distribución porcentual de las divisiones algales por estación de muestreo (segundo muestreo).

6.4.1 Algas y fitoplancton

6.4.1.1 *Chroococcus* sp. ó *Merismopedia* sp.

(Bourelly, 1970)

Características del género.- Procariotas (sin núcleo verdadero), autótrofos. Organismos pancrónicos, sin variaciones considerables desde hace 2700 millones de años (Precámbrico). Poseen una gran adaptabilidad, ocupan medios húmedos y acuáticos muy variados, incluyendo fuentes termales, aguas frías, saladas, dulces y sobrecargadas de sales; ciertas especies presentan una amplia tolerancia a la alternancias de sequedad y humedad; son organismos reminiscentes, pero sólo vegetan en condiciones húmedas; ciertas especies soportan bien las variaciones en salinidad (eurihalinos). Algunas especies se presentan asociadas con bacterias sulfurosas y, en ciertos fondos, llegan a formar sapropeles, que se considera la sustancia madre del petróleo, presentando gran resistencia al ácido sulfúrico. Algunas especies son termófilas, soportan hasta 80-85°C y, junto con las bacterias, son los únicos organismos que pueblan estas aguas. En ciertas condiciones algunas especies planctónicas pueden desarrollarse rápidamente en grandes cantidades formando las llamadas floraciones de agua, principalmente en aguas eutróficas durante el verano. En las floraciones de agua se producen sustancias antibióticas (alelopáticas) que detienen o ralentizan el desarrollo de los demás seres planctónicos. Otras especies fijan el carbonato cálcico a la vaina mucilaginoso contribuyendo a la formación de estromatolitos

Nutrición.- La mayoría son autótrofas, algunas son heterótrofas o saprofitas, algunas son parásitas, viven en el tubo digestivo de herbívoros (cobayas) y en batracios anuros, algunas son heterótrofas pero poseen clorofila y viven en simbiosis.

Clasificación:

División: Cyanobacteria

Clase: Cyanophyceae

Orden: Chroococcales

Género: *Chroococcus* ó *Merismopedia*

6.4.1.2 *Gomphosphaeria* sp. (Kützing, F.T. 1836)

Características del género.- Forman colonias unicelulares microscópicas, de forma esférica o irregular, comúnmente compuestas de varias colonias hermanas, viven libres principalmente en el metafiton, generalmente envueltas por fino mucílago. Poseen un sistema de pequeñas ramificaciones parenquimatosas orientadas radialmente como una especie de tallos rodeando las células. Las células radialmente orientadas y situadas en la periferia de una colonia son siempre elongadas de forma ovalada o en forma apilada. Después de la división permanecen unidas durante un largo ciclo de su vida formando su característica estructura cordiforme. Las formas solitarias son cordiformes y siempre están ligeramente distantes unas de otras y con forma ligeramente radial. Estas células azul verdes sin aerotopos (vacuolas de gas), algunas veces tienen gránulos solitarios en colonias más o menos periféricas y colocadas radialmente. La división se da en dos direcciones en las subsecuentes generaciones, en forma perpendicular a cada una y a la superficie de la colonia. Las células hijas permanecen unidas después de la división formando un cordón de células. La reproducción también se puede dar por la disociación de colonias. La mayoría de las especies es libre nadadora en lagos y en pantanos entre otras algas y plantas acuáticas en áreas de distribución limitadas. Dos especies son exclusivamente de zonas tropicales. *Gomphosphaeria* es una cianobacteria que forma parte de la flora acuática que habita en las aguas salinas. Junto con otro reducido grupo de algas y cianobacterias es capaz de soportar condiciones extremas de salinidad. El género comprende menos de una decena de especies y pueden vivir en lagunas y cursos fluviales de diferente naturaleza.

Clasificación:

División: Cyanobacteria,

Clase: Cyanophyceae

Subclase: Oscillatoriophycideae

Orden: Chroococcales

Genero: *Gomphosphaeria*

6.4.1.3 *Microcystis* sp.

Características del género.- Plancton de agua dulce y salobre, procariotas (sin núcleo verdadero), autótrofos, organismos pancrónicos, sin variaciones considerables desde hace 2700 millones de años (Precámbrico). Con gran capacidad de adaptación, ocupan medios húmedos y acuáticos muy variados, incluyendo fuentes termales, aguas frías, saladas, dulces y sobrecargadas de sales; ciertas especies presentan una amplia tolerancia a alternancias de sequedad y humedad; son organismos reminiscentes, pero sólo vegetan en condiciones húmedas; ciertas especies soportan bien las variaciones en salinidad (eurihalinos). Algunas especies asociadas con bacterias sulfurosas y en ciertos fondos llegan a formar sapropeles, presentando gran resistencia al ácido sulfúrico. Asimismo, algunas especies son termófilas, soportan hasta 80–85 °C, junto con las bacterias son los únicos organismos que pueblan estas aguas. En ciertas condiciones algunas especies planctónicas pueden desarrollarse rápidamente en grandes cantidades formando las llamadas floraciones de agua, fundamentalmente en aguas eutróficas en los meses de verano. En las floraciones de agua se producen sustancias antibióticas (alelopáticas) que detienen o ralentizan el desarrollo de los demás seres planctónicos; otras especies fijan el carbonato de calcio a la vaina mucilaginosa contribuyendo a la formación de estromatolitos.

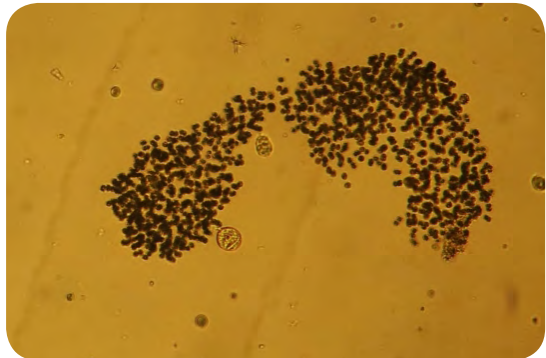
Clasificación:

División: Cyanobacteria,

Clase: Cyanophyceae

Orden: Chroococcales

Género: *Microcystis*



6.4.1.4 *Gloeocapsa punctata* (Nägeli 1879)



Clasificación:

Imperio: Prokaryota

Reino: Eubacteria

SubReino: Negibacteria

Phylum: Cyanobacteria

Clase: Cyanophyceae

Subclase: Oscillatoriophycideae

Order: Chroococcales

Familia: Microcystaceae

Genero: *Gloeocapsa*

Especie: *punctata*

Características.- Algas verde azules de 1-3 μm de diámetro, esféricas, de forma más o menos irregular distribuidas en forma dispersa o en agregados densos. El arreglo en colonias muestra el desarrollo de una envoltura mucilaginosa. Las colonias llegan a medir de 20 a 60 μm de diámetro, compuestas de numerosas subcolonias. El mucílago es incoloro, de forma irregular; en las colonias viejas no tienen color, y está delimitado en forma de capas visiblemente concéntricas. Al microscopio el mucílago se observa de color verde grisáceo (<http://www.bioref.lastdragon.org/Cyanobacteria/Gloeocapsa.html>).

Pediastrum:

Características del género.- Alga verde de distribución cosmopolita, principalmente de agua dulce; únicamente el 10% es de agua salada; son típicamente planctónicas, se encuentran en lagos, lagunas, charcas, pantanos, embalses. Se han encontrado

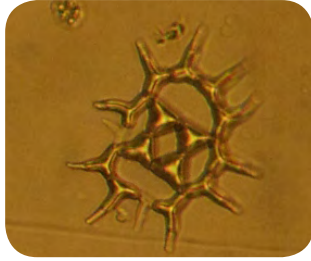
fósiles pertenecientes al bajo Cretácico (146–113 millones de años) en el alto Cretácico (113–65 millones de años) y en el Mioceno (14 millones de años).

El género está caracterizado por ser de una célula o encontrarse en forma colonial, consistente en muchas células que pueden ir de 2 (raras), 4, 8, 16, 32, 64, 128 células o múltiplos de 2, dependiendo de la especie (generalmente de 4 a 64 células). Muchas especies tienen forma de colonias en forma de estrella aplanada, circular y a veces irregularmente subcircular en su configuración. Una colonia comprende dos diferentes formas de células: aquellas que son de una capa simple o de muchas capas. La periferia de las células tiene una, dos o tres tipos de formas, que incluyen figuras y número de proyecciones muy importantes para la identificación. La presencia o ausencia de perforaciones y ornamentaciones de la pared celular son diferentes y se consideran para la identificación taxonómica.

La reproducción asexual en esta alga es a través de la formación de autocolonias. En este proceso la zoospora biflagelada, móvil con dos flagelos, son producidos por las células en una colonia y son envueltas en una vesícula que está en forma emergente en la capa de células de la colonia; no todas las células producen zoosporas. Estas, se reproducen mitóticamente por división nuclear repetida sin citoquinesis, la división citoplasmática produce una célula parental multinucleada y tienen un arreglo particular en cada especie. Después de la citoquinesis sincrónica de muchos núcleos, muchas células uninucleadas hijas se transforman en zoosporas biflageladas que se liberan dentro de unas vesículas donde nadan libremente. En seguida, cada zoospora se libera para formar una nueva colonia hija soportada a través de microtúbulos, proceso conocido como formación de una autocolonia.

Las células se alargan hasta alcanzar un tamaño adecuado. Cada célula puede generar una autocolonia hija con exactamente el mismo número y arreglo de células de la colonia original. Se reproduce sexualmente vía la fusión de pequeños isogametos biflagelados que son liberados de la célula parental. Los cigotos germinan dentro de zoosporas, las cuales en su momento están dentro de poliedros que generan nuevos cenobios. Estos poliedros pueden también resultar de la reproducción asexual (<http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/indexmag.html>). (<http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/artsep01/pediastrum.html>).

6.4.1.5 *Pediastrum simplex* (Meyen 1829)



Clasificación:

Imperio: Eukaryota

Reino: Plantae

Phylum: Chlorophyta

Clase: Chlorophyceae

Orden: Sphaeropleales

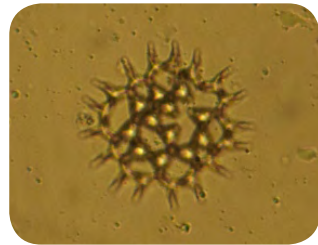
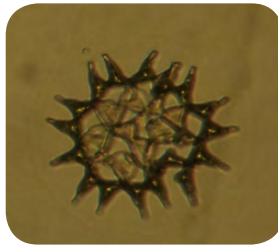
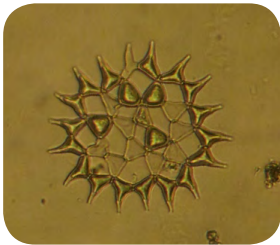
Familia: Hydrodictyaceae

Género: *Pediastrum*

Especie: *simplex*

Características.- La cubierta de celulosa está salpicada de pequeños granos que le dan relieve y que no se aprecian cuando los cloroplastos tiñen de verde su interior. Es un alga colonial con forma de flores y estrellas verdes bastante común, que vive en aguas estancadas y ricas en materia orgánica. Pasado el invierno tiñe de verde el agua de las charcas y lagunas que habita (<http://www.biodiversidadvirtual.org/micro/Pediastrum-simplex.-img323.html>).

6.4.1.6 *Pediastrum duplex* (Meyen 1829)



Clasificación:

Imperio Eukaryota

Reino Plantae

Phylum Chlorophyta

Clase Chlorophyceae

Orden Sphaeropleales

Familia Hydrodictyaceae

Género *Pediastrum*

Especie: *dúplex*

Características.- Microalga colonial con forma muy característica. Se diferencia de otras especies del mismo género en las amplias lagunas existentes entre las células centrales. Las células marginales son profundamente recortadas, sólo fusionadas en la base, y presentan dos lóbulos muy prolongados (<http://www.ufjf.br/ppgpmi/files/2010/04/atlas-de-microorganismo2.pdf>).

***Ceratium*:**

Características del género.- *Ceratium* es un género de protistas dinoflagelados de la clase Dinophyceae, orden Gonyaulacales, familia Ceratiaceae, con células asimétricas y comprimidas dorsiventralmente, de forma pentagonal. Se distingue por tener una teca compuesta de placas con ornamentaciones que le ayudan a flotar, pero no nadar rápidamente. Las ornamentaciones tienden a ser pequeñas y delgadas para aquellas especies que habitan en aguas frías y saladas; y son más largas y más delgadas si habitan en aguas menos saladas y cálidas. Las de la izquierda como de la derecha son divergentes. Las placas son gruesas y bien visibles, a menudo reticuladas, con procesos o cuernos, uno anterior y 2 o 3 posteriores. En la parte media ventral se localiza una placa gruesa y desarrollada, numerosos cromatóforos discoideos y dos tipos de flagelos heterocontos: 1) flagelos anteriores que dividen a la célula en las mitades derecha e izquierda; y 2) dos flagelos originados en una posición ventral: uno acronemático (liso, terminado en una fibrilla), posterior, localizado en un surco longitudinal o sulcus con movimiento pulsátil para el desplazamiento; y otro acintado a nivel ecuatorial, en un surco transversal, o cingulo, con movimiento en espiral, responsable del giro. Los surcos de los cuales surge el flagelo son muy parecidos en la misma especie y dividen a la célula en epiteca e hipoteca. Las especies de este género junto con *Peridinium*, son más comunes

en la costa; pocas son de agua dulce. Organismos autótrofos, fotosintetizadores o quimiosintetizadores (que pueden obtener su energía de la luz o de compuestos químicos) y heterótrofos (que consumen otros organismos, lo que les permite obtener ventajas de los diversos ambientes lacustres). Reproducción asexual por división celular, implica bipartición longitudinal (transversal u oblicua) en los dinoflagelados tecados. Mediante el proceso de ecdisis se libera la teca y las células hijas forman una nueva, o, por división de la teca en dos mitades, cada célula regenera la parte que falta. En la reproducción sexual puede haber homotalismo o heterotalismo. Las células vegetativas son haploides y hay anisogamia; los gametos son semejantes a las células vegetativas pero más pequeños; el gameto masculino es absorbido dentro del femenino, el cigoto permanece flagelado o pierde los flagelos según las especies. En las terrestres hay un enquistamiento tras el cual se produce meiosis, durante la cual el núcleo comienza a girar en un proceso que se llama ciclosis nuclear, este proceso está correlacionado con el apareamiento cromosómico. De distribución cosmopolita (aguas cálidas y templadas), se desarrollan en ambientes con una salinidad de entre 13 y 35 mg/L, y a temperaturas entre los 20 y 34°C. No son tóxicos y son necesarios en la cadena trófica pero generan florecimientos en las costas, los estuarios y el mar. Pueden generar mareas rojas tóxicas en el mar y agotar los recursos del medio, generando un daño al ecosistema (<http://www.sahfos.ac.uk/taxonomy/phytoplankton/dinoflagellates/ceratium-lineatum.aspx>);(http://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=52149);(<http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/ibc99/botanica/botanica/dinophyc.htm>).

6.4.1.7 *Ceratium furca* (Ehrenberg) Claparède & Lachmann 1859.

Clasificación:

Imperio: Eukaryota

Reino: Chromista

Phylum: Dinophyta

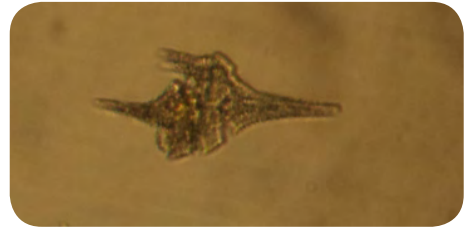
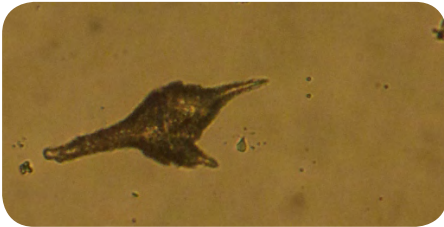
Clase: Dinophyceae



Orden: Gonyaulacales
Familia: Ceratiaceae
Género: *Ceratium*
Especie: *furca*

Ceratium furca tiene una amplia faja y un prominente cuerno apical recto y dos astas posteriores desiguales. El cuerno derecho es más corto que el izquierdo. Hay una barra fina que conecta los dos cuernos. Es de color amarillo-marrón y tiene gruesas placas tecales (https://www.eoas.ubc.ca/research/phytoplankton/dinoflagellates/ceratium/c_furca.html).

6.4.1.8 *Ceratium lineatum* (Ehrenberg) Cleve 1899



Clasificación:

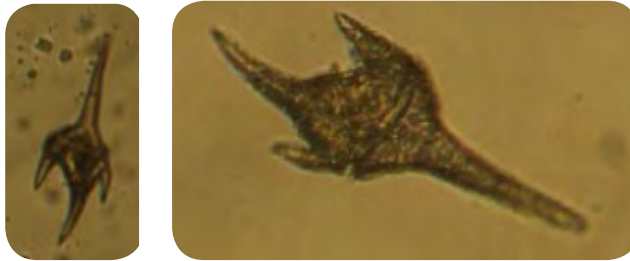
Imperio: Eukaryota
Reino: Chromista
Phylum: Dinophyta
Clase: Dinophyceae

Orden: Gonyaulacales
Familia: Ceratiaceae
Género: *Ceratium*

Las células tienen de 80 a 400 micras de longitud, fuertemente comprimidas dorsoventralmente. El cuerno apical es largo y estrecho, con una punta roma. Los cuernos son apicales de hormigas recta con puntas, puntas cerradas. Los cuernos antiapicales normalmente son divergentes ligeramente entre sí en sentido distal.

Un tercer cuerno antiapical puede estar presente. *C. hirundinella* puede aparecer formando cadenas cortas y se sabe que tiene una amplia tolerancia a la salinidad (<http://eol.org/pages/918973/overview>).

6.4.1.9 *Ceratium hirundinella* (O.F.Müller) Dujardin 1841



Clasificación:

Imperio: Eukaryota

Reino: Chromista

Phylum: Dinophyta

Clase: Dinophyceae

Orden: Gonyaulacales

Familia: Ceratiaceae

Género: *Ceratium*

Especie: *hirundinella*

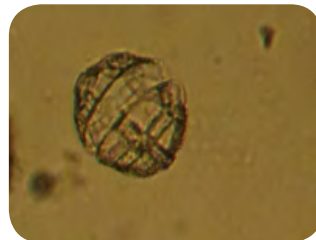
Las células tienen de 80 a 400 micras de longitud, fuertemente comprimidas dorsoventralmente. El cuerno apical es largo y estrecho, con una punta roma. Los cuernos son apicales de forma recta con puntas, puntas cerradas. Los cuernos antiapicales normalmente son divergentes ligeramente entre sí en sentido distal. Un tercer cuerno antiapical puede estar presente. *C. hirundinella* puede aparecer formando cadenas cortas y se sabe que tiene una amplia tolerancia a la salinidad (<http://eol.org/pages/918973/overview>).

Peridinium

Características del género.- *Peridinium* es un alga con capacidad de movimiento giratorio al que hace alusión el nombre del grupo, dinoflagelados (dinos: girando). El flagelo transversal proporciona la mayor parte de la fuerza que propulsa a la célula con su movimiento giratorio distintivo. El flagelo longitudinal hace las funciones de timón y estabiliza el movimiento, aunque también produce una cierta fuerza propulsora. Su cubierta está formada por placas de celulosa que componen una especie de armadura llamada teca que adopta diversas formas y puede presentar distintas estructuras que en muchas ocasiones son características de la especie y a veces de la etapa del ciclo de vida. *Peridinium* presenta plastos en forma de disco con clorofilas “a” y “c” y algunas xantofilas. Esta mezcla da lugar a su apariencia dorada característica. *P. cinctum* presenta un contorno casi circular.

Algunos dinoflagelados conservan un pequeño núcleo en los cloroplastos, lo que sugiere su origen endosimbiótico, probablemente una asociación entre cianobacterias primitivas y un organismo flagelado incapaz de realizar la fotosíntesis y de cuya unión surgieron estos seres. Muchos de ellos poseen una pequeña mancha ocular con la que pueden detectar dónde está situada la fuente luminosa e incluso, algunos se defienden lanzando tricocistos, pequeños arpones tóxicos que pueden neutralizar a un posible enemigo. *P. cinctum* es una especie relativamente común que vive casi en cualquier tipo de ambiente acuático, moviéndose sobre su órbita entre la vegetación sumergida de las orillas (<http://www.biodiversidadvirtual.org/micro/Peridinium-cinctum.-img313.html>).

6.4.1.10 *Peridinium ovatoides* o *Peridinium cinctum* (O.F.Müller) Ehrenberg





Clasificación:

Imperio: Eukaryota

Reino: Chromista

Phylum: Dinophyta

Clase: Dinophyceae

Orden: Peridinales

Familia: Peridiniaceae

Género: *Peridinium*

Especie: *cinctum*

Células esféricas a ovales, aplanadas dorsiventralmente (40-78 x 40-73 μm). Cíngulo con reborde, espiralado hacia la izquierda. Sulcus con reborde que se extiende hasta 1/3 de la epiteca y hasta el antiapical. Epiteca algo mayor que la hipoteca. Ambas con placas gruesas y reticuladas

Melosira.

Características del género: Algas unicelulares coloniales. Pared celular silíceas, formada por dos valvas y varias bandas cingulares o conectivas (frústulas); cada elemento de la pared celular es formado dentro del citoplasma en una vesícula particular; plastos discoidales, laminares, lobados, con forma de H, X o C, alargados lateralmente, centrales, axiales o polares, pardo dorados por exceso en la proporción de fucoxantina respecto a las clorofilas a y c; membrana externa, relacionada con el retículo endoplásmico; tilacoides en grupos de 3, sin formar grana o pseudograna; pirenoides intraplastidiales presentes. Células flageladas sólo en los gametos masculinos de las diatomeas céntricas. Ciclo de vida diplonte con meiosis gamética; reproducción asexual por división vegetativa, la cual disminuye la talla

poblacional que al llegar a límite más pequeño favorece la reproducción sexual; la célula inicial resultante restituye nuevamente la talla máxima de la especie. El significado ecológico de su presencia es que indican condiciones de mesotrofía a eutrofía, es decir, se presentan en respuesta a diferentes condiciones ambientales por la progresión natural del ciclo anual (<http://biology.missouristate.edu/phyco-logy/asian%20carp/melosira-a-w.jpg>).

6.4.1.11 *Melosira* sp. (C. Agardh, 1824)

Clasificación:

Imperio: Eukaryota

Reino: Chromista

Phylum: Heterokontophyta

Clase: Coscinodiscophyceae

Orden Melosirales

Familia: Melosiraceae

Género: *Melosira*

6.4.2 ZOOPLANCTON

Trachelomonas.

Características del género.- Organismo libre nadador, solitario, con células completamente encerradas en una envoltura con un cuello bien definido o collar rodeando un poro apical a través del cual sale un flagelo muy largo que le sirve como aparato locomotor. Las células desnudas escapan de la envoltura durante la reproducción (y en otros momentos), pero secretan inmediatamente una nueva envoltura con una forma y tamaño específico para cada especie (esférica, ovoide, elipsoidal, o elongada), la cual es de color pálido y poco definida al principio, pero llega a ser muy ornamentada (poros, espinas, crestas, verrugas, etc.) y de color café, con un poco de sales de manganeso y de hierro; muchas especies son verdes, fototróficas, con cloroplastos de diferentes tipos (numerosos, pequeños, discoidales, sin pirenoides; de placas planas con una doble vaina en los pirenoides; las placas planas con pirenoides proyectados; o placas planas con pirenoides des-

nudos); unas pocas especies no tienen color y son osmotróficas; todas las otras características son similares a *Euglena* (http://www.algaebase.org/search/genus/detail/?genus_id=43657&session=abv4:CFF994010578e282A6lqR3FF6B31).

6.4.2.1 *Trachelomonas* sp. (Ehrenberg, 1835)

Clasificación:

Imperio: Eukaryota

Reino: Protozoa

Phylum: Euglenophyta

Clase: Euglenophyceae

Orden: Euglenales

Familia: Euglenaceae (1)

Género: *Trachelomonas*



6.4.2.2 *Brachionus havanaensis* (Rousselet)

Clasificación:

Phylum: Rotifera

Clase: Monogononta

Orden: Ploima

Familia: Brachionidae

Género: *Brachionus*

Especie: *havanaensis*



Descripción.- Generalmente tiene dos espinas posteriores. Una espina anterior intermedia es rara, pero puede estar presente en forma reducida. La longitud de la lorica es de 135 a 350 μm , las espinas posterolaterales tienen una longitud de 26 a 172 μm , la espina lateral de 25 a 60 μm y si existe la espina anterointermedia con una longitud de 2 a 5 μm y la espina anteromedial de 15 a 25 μm . El ancho de la lorica es de 73 a 118 μm .

Ecología.- La especie está ampliamente distribuida en los cuerpos de agua del continente Americano. Tolera rangos amplios de temperatura y concentraciones de alimento y a su vez sirve como alimento a ciertos invertebrados depredadores, tales como *Asplanchna* spp., aspecto que la coloca como especie de zooplancton importante en cuerpos de agua dulce tropicales y de altitud. La sobrevivencia de la especie se puede asociar a las espinas como una adaptación contra la depredación y a su alto potencial reproductivo que lo habilita para competir con otras especies de Brachionidae (*Keratella cochlearis*, *K. tropica*, *B. budapestinensis* y *B. Calyciflorus*) con las que frecuentemente aparece. Los principales factores que controlan su historia de vida son los nutrientes (calidad y abundancia de algas) y la temperatura que influye en los procesos metabólicos. Las altas temperaturas aceleran la maduración de los huevos, la madurez con la edad y la tasa de producción de huevos y su eclosión. Las bajas temperaturas generalmente producen el efecto contrario. La temperatura y la calidad y cantidad de comida generalmente tienen efectos sinérgicos (Pavón-Meza 2005). Los rotíferos son uno de los componentes de la fauna que se utilizan como bioindicadores de los cuerpos de agua dulce (Karuthapandi et al. 2013).

6.4.2.3 *Bosmina longirostris*

Clasificación:

Reino: Animalia

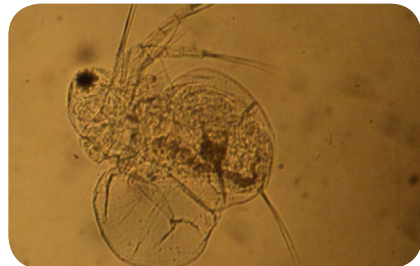
Clase: Branchiopoda

Orden: Diplostraca

Familia: Bosminidae

Género: *Bosmina*

Especie: *longirostris*



Descripción física.- Organismos llamados comúnmente pulgas de agua por su aspecto físico y movimientos parecidos al de las pulgas, que aplica a las 620 especies de este género. Los miembros de *B. longirostris* son sexualmente dimórficos. Las hembras tienen un tamaño entre 0.4 y 0.6 mm de largo, mientras que los machos miden de 0.4 y 0.5 mm de largo. Las hembras tienen anténulas largas que cubren la parte posterior de la cabeza las cuales están ausentes en los machos. Ambos sexos tienen un mucro, o punto afilado en su cabeza que varía de posición. La función del mucro en *B. longirostris* es desconocida pero sirve para distinguirla de otras especies cercanas como *Eubosmina* spp., la cual carece de esta estructura. También tienen un caparazón, el cual luce como una concha doblada que cubre al animal, colocada a ambos lados en la parte ventral. La longitud del mucro y el caparazón varían con la estación. Son organismos ectotérmicos, de simetría bilateral.

Distribución geográfica.- Se encuentran en los lagos y charcas interiores a través de todo el mundo, tanto en climas templados como en los tropicales, incluyendo las regiones Neártica, Neotropical, Paleártica y Etiópe, que incluye partes de África, Europa y Norteamérica.

Hábitat.- Es común encontrarla en lagos, humedales, pantanos, marismas y charcas. También puede encontrarse en las zonas litorales de los pantanos. Esta ampliamente asociada a las aguas de corrientes lentas y frecuentes en la superficie, donde la concentración de algas es alta ya que son su fuente de alimento. Inmediatamente después de la eclosión la longitud del cuerpo es aproximadamente 0.21 mm. Cuando la comida se escasea detiene su crecimiento después de la maduración y utiliza toda su energía para la reproducción. Si la concentración de alimento es alta, continúan creciendo después de la maduración sexual, alcanzando la madurez entre 3.14 a 5.83 días de nacidas. La longitud del caparazón crece desde que nacen hasta los 20 días, pero su tasa de crecimiento decrece con la edad. Eclosionan como juveniles y son considerados adultos una vez que son tan largos como el huevo más pequeño de la hembra. Tienen tres tipos de reproducción: la sexual, la partenogénesis cíclica y la partenogénesis obligada. Es poliginándrica, ambos machos y hembras tienen múltiples apareamientos.

La reproducción es muy dependiente del ambiente. Cuando realiza la partenogénesis, producen el mismo género del pariente que las generó. Sin embargo,

hay poca información acerca de la partenogénesis. Los estudios en las regiones templadas muestran que se reproducen mediante la partenogénesis facultativa, permitiendo la reproducción sexual; mientras que en las regiones árticas se reproduce por partenogénesis obligada, o a través de la reproducción asexual. Se reproducen todo del año, pero más activamente de mayo a junio y de agosto a septiembre cuando el crecimiento algal es más rápido. Su tasa reproductiva es dependiente de la cantidad de alimento que hay disponible en el medio.

Las hembras de *B. longirostris* son sexualmente maduras cuando ponen por primera vez huevos, en su bolsa. Esta especie madura más rápido que la disponibilidad de alimento. La variación de la concentración de alimento puede causar diferencias en el número de huevos producidos; si hay más alimento disponible en el medio, producirán más huevos (arriba de cuatro huevos a un tiempo). Durante su historia de vida, las hembras ponen de 1 a 11 huevos (Lee 2014).

6.4.2.4 *Diaphanasoma birgei* (Korinek 1981)

Clasificación:

Reino: Animalia

Clase: Branchiopoda

Orden: Diplostraca

Familia: Bosminidae

Género: *Bosmina*

Especie: *longirostris*



Características.- *D. birgei* es una especie limnética. Su cabeza abarca 2/3 de la longitud y la mitad del ancho del caparazón. Un ojo pequeño se localiza cerca del margen medioventral de la cabeza. El cuerpo es transparente. La segunda antena alcanza el margen posterior del caparazón cuando se flexiona. Los machos se distinguen de las hembras por sus anténulas alargadas y la primera pata en

forma de gancho. Se encuentra en África y América. Se alimenta de *Ankistrodesmus*, *Aphanothece*, *Arthrodesmus*, *Asterionella*, *Chroococcus*, *Chroomonas*, *Cosmarium*, *Crucigenia*, *Cryptomonas*. Y es depredado por copepodos, *Daphnia* spp., el pez negro, *Diacyclops thomasi*, *Epischura lacustris*, entre otros (https://books.google.com.mx/books?id=FqMpS5XUPaAC&pg=PA54&lpq=PA54&dq=-Diaphanosoma+birgei+species+description&source=bl&ots=QnGE3JMdcI&sig=-jYsgrbs3yZQLBxNqbJ0tcH6xQ3k&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjdx6_Z8arMA-hWpMoMKHb2xBokQ6AEIHjAB#v=onepage&q=Diaphanosoma%20birgei%20species%20description&f=false); (http://animaldiversity.ummz.umich.edu/accounts/Diaphanosoma_birgei/classification/).

6.4.2.5 *Keratella cochlearis*

Clasificación:

Reino: Animalia

Phyllum: Rotifera

Clase: Monogononta

Orden: Ploimida

Familia: Brachionidae

Género: *Keratella*

Especie: *cochlearis*



Características.- Rotífero pseudocelomado planctónico sin extremidades, caracterizado por la alta heterogeneidad espacial y temporal en su morfología, como las longitudes de la lóricas y de la espina posterior. La forma tecta (contraparte de la típica), no presenta la espina posterior, condición paedomórfica en la que el blastocele permanece aun cuando el animal alcance la madurez. Se piensa que es una condición derivada secundariamente. Se encuentra en lagos estratificados. Aparece estacionalmente en el epilimnion y en el hipolimnion en respuesta al estado trófico. Por lo regular, la espina aparece en presencia de depredadores como los cladoceros, copépodos ciclopoideos y *Asplanchna*. La forma típica puede surgir de una madre tecta y viceversa. *K. cochlearis* es una especie ubicua, encontrada en casi cualquier cuerpo de agua a través de todo el mundo. Capaz de sobrevivir con

poco alimento, se encuentra en sitios pobres en zooplancton. Su pequeño tamaño indica que sus poblaciones pueden ser impactadas por los depredadores. La corona ciliada le confiere un movimiento de rotación cuando se desplaza, pero su función principal es generar corrientes para realizar el filtrado eficiente. Los cilios dirigen las partículas alimenticias al túnel bucal y luego al mástax donde son masticadas por el trofi. Comen principalmente fitoplancton como *Cryptomonas* y *Chlamydomonas*. La reproducción es partenogénica. La hembra produce por mitosis un huevo $2n$ que genera un clon $2n$ de la madre. Notablemente, la descendencia clonal puede variar respecto a la forma del cuerpo de la madre. La reproducción sexual ocurre periódicamente en respuesta a estímulos desconocidos. La hembra produce un huevo $1n$ por meiosis, algunos de los cuales eclosionan en machos $1n$, los cuales mediante mitosis, crean esperma $1n$ que fertilizará un huevo $1n$, el cual eclosiona en una hembra $2n$, cerrando así el ciclo. (Galkovskaya y Mityanina 1989; [http://people.cst.cmich.edu/mcnau1as/zoo plankton%20web/Keratella/Ker.html](http://people.cst.cmich.edu/mcnau1as/zoo%20plankton%20web/Keratella/Ker.html)).

6.4.2.6 *Cyclops* sp.



Clasificación:

Reino: Animalia

Clase: Branchiopoda

Orden: Diplostraca



Familia: Bosminidae

Género: *Bosmina*

Especie: *longirostris*

Pertenece a las llamadas pulgas de agua. Comunes en las aguas estancadas como pozos y estanques, a las que están muy bien adaptados en áreas agrícolas o periurbanas. En África sub-Sahariana, India y Yemen son huéspedes intermedios del gusano de Guinea *Dracunculus medinensis*, causante de la dracunculiasis. Se transmite al beber agua que contiene *Cyclops* infectados. Apenas visible (0.5–2 mm), puede ser reconocido por su nado espasmódico. Comen plancton y otros organismos acuáticos pequeños. Las hembras se reproducen sin fecundación por muchas generaciones hasta que el hábitat se seca, entonces producen una generación de machos y hembras que producen huevos fertilizados. Resisten la sequía de una estación a otra, y una vez lleno el estanque, aparecen en los siguientes 30 minutos. Un día después, se han desarrollado a hembras maduras. Los huevos se dispersan fácilmente mediante animales y corrientes para comenzar nuevas poblaciones. Su densidad es alta durante la estación seca en pequeñas charcas, y máxima en las zonas áridas durante las lluvias. Se reporta una distribución latitudinal entre los 88.42° y -32.2°, longitudinal de -147° a 129.92°, y profundidad máxima de 100 m. Se alimenta de bacterias, *Cryptomonas spp.*, Diatomeas, *Keratella spp.*, *Moina spp.*, Rotíferos, *Camallanus lacustris* y *Cephalochlamys namaqensis*. Requiere temperaturas de entre -1.57 a 38 °C; de 0.016 a 3.72 µmol/L de nitrato; de 7.37 a 21.56 µmol/L de silicato; de 0.22 a 0.98 µmol/L de fosfato; de 20.83 a 31.7 PSU de salinidad; y de 8.02 a 8.97 mL/L de oxígeno, con una saturación de 109.82 %. Es depredado por *Asplancha spp.*, la trucha café, insectos y *Megacyclops spp.*, entre otros (http://www.who.int/water_sanitation_health/resources/vector324to336.pdf); (<http://eol.org/pages/14332/data>).

6.4.2.7 *Limnocalanus macrurus* (G. O. Sars, 1863).

Clasificación:
Reino: Animalia
Phylum: Arthropoda
Subphylum: Crustacea
Clase: Maxillopoda
Subclase: Copépoda
Order: Calanoida



Familia: Centropagidae

Género: *Limnocalanus*

Especie: *macrurus*

Descripción.- Esta especie fue asociada en 1968 con *L. Grimaldi* (DeGuerne, 1886), la cual fue reportada como una subespecie de *L. macrurus*. Los taxónomos decidieron que las diferencias morfológicas entre las dos subespecies estaban determinadas simplemente por la duración del tiempo en que las poblaciones habían sido separadas de los océanos.

Anatomía.- Los adultos de *L. macrurus* se encuentran dentro del rango de 2.4 - 2.9 mm, con pocas características distintivas entre los sexos. Los machos ligeramente más pequeños que las hembras (Balcer et al. 1984; Czaika 1982), que tienen un eje mediano simple y las partes de la boca con maxilipedios especialmente alargados. Ambos sexos tienen un rami con 5 setas terminales (Balcer et al. 1984). Las hembras tienen tres urosomas segmentados con segmentos genitales alargados, pero ellas no llevan los sacos de huevos. Los machos con cinco urosomas segmentados y una antena derecha genital. Muchos otros machos copépodos calanoides no tienen un quinto brazo elongado para mantener el nado (https://www.google.com.mx/search?q=limnocalanus&ie=utf-8&oe=utf-&rls=org.mozilla:es-MX:official&client=firefox-a&channel=sb&gfe_rd=ctrl&ei=B4ILU6HXFKWR8QeYkQE&gws_rd=cr).

6.5 CONCLUSIONES

La mayoría de las especies planctónicas encontradas en la Laguna de Tuxpan, son organismos que toleran alta concentración de sal y se presentan frecuentemente en aguas cálidas. Algunos pueden comportarse como organismos autótrofos o heterótrofos según sean las características del medio. Generalmente se encuentran en aguas con alto contenido de nutrientes, clasificadas como mesotróficas o eutróficas, aspecto que ubica al lago en un grado mesotrófico avanzado (Capítulo 5), que se explica por el gran aporte de nutrientes por parte de las subcuencas de la Laguna de Tuxpan y del río El Tomatal.

La depredación selectiva y la competencia frecuentemente interactúan para determinar la composición, la estructura y la variación de las comunidades planctónicas. Los sedimentos suspendidos y las cianobacterias filamentosas no tóxicas pueden interferir con la conducta alimenticia de los depredadores, y pueden afectar las concentraciones umbrales de alimento, alterando la jerarquía competitiva dominante. Estudios recientes señalan otros factores que pueden cambiar las relaciones de competencia estacional entre el zooplancton. Ciertos tóxicos, como los químicos o las cianobacterias, pueden afectar la habilidad competitiva. Las cianobacterias tóxicas pueden reducir en forma diferencial la sobrevivencia y las tasas de crecimiento de las especies de zooplancton. Los florecimientos de cianobacterias están frecuentemente acompañados de cambios en la estructura de la comunidad del zooplancton, donde los pequeños cladóceros y rotíferos dominan (Saratonov 1995).

Alva (2007), señala que *Microcystis aeruginosa* es una cianobacteria altamente tóxica que afecta a varios grupos de animales (desde zooplancton hasta mamíferos). Es común en cuerpos de agua tropicales y puede ser tan abundante que abate la transparencia del agua hasta < 10 cm de transparencia al Disco de Secchi, previniendo el crecimiento de otros grupos fotosintéticos y algas verde azules. La incapacidad del zooplancton para alimentarse de esta especie está

relacionada con la presencia de toxinas. Las colonias grandes de unas 1,000 μm de diámetro, frecuentemente causan problemas mecánicos para su ingesta por el zooplancton. Asimismo, la presencia de toxinas está frecuentemente relacionada a los cambios estacionales y a la densidad del zooplancton. Entre el zooplancton de agua dulce, los rotíferos son frecuentemente más abundantes y diversos que los crustáceos, lo que sugiere alguna posible coexistencia de los rotíferos con las cianobacterias. Alternativamente, los rotíferos pueden evitar comer directamente *Mycrosistis*. Sin embargo, pueden alimentarse de cianobacterias en descomposición. En laboratorio, *Brachionus havanaensis* tiene tasas de crecimiento negativo cuando se alimenta con *M. aeruginosa* en alta proporción (75%), reflejando su sensibilidad a la ficotoxina. Sin embargo, puede desarrollarse cuando *M. aeruginosa* se encuentra en bajas proporciones (25%) y junto con otras algas.

Sartonov (1995), señala que *M. aeruginosa* disminuye la habilidad depredatoria de *Daphnia pulex* y libera de esta presión a *Keratella cochlearis*. Los adultos de *Daphnia* impactan en alto grado a los rotíferos al causar una reducción significativa en el crecimiento de las poblaciones de *Keratella*, como lo señala la correlación positiva de la mortalidad de *Keratella* con las tasas de filtración y el tamaño del cuerpo de *Daphnia*. Por lo tanto, las tasas de alimentación y el tamaño de la población de *Daphnia* determina su influencia potencial sobre los rotíferos.

Heaney y Talling (1980), señalan que el éxito de *Ceratium* puede ser atribuido a varios factores. Una vez establecida la especie, la formación de quistes en el otoño y su germinación en la primavera probablemente reduce la necesidad de sobrevivencia de células vegetativas en el plancton. Asimismo, por su tamaño no son objeto del pastoreo del zooplancton y no se conoce que sea parasitado por hongos en las células vegetativas. Su movilidad la capacita para permanecer en la zona eufótica y evitar la sedimentación durante los periodos de estabilidad térmica. La habilidad de *Ceratium* para migrar y regular activamente su posición en profundidad en la columna de agua, bajo condiciones de calma, puede capacitarla para mejorar su posición en los gradientes verticales de luz, temperatura, gases y nutrientes disueltos. Sin embargo, los periodos prolongados de baja turbulencia pueden restringirla a una capa epilimnética delgada con la termoclina ubicada entre 3 y 5 m. Asimismo, la desoxigenación del agua por debajo de los

4 m y la escases de nitrógeno inorgánico en la capa superior, generan condiciones de estrés para el fitoplancton por la alta irradiancia, el alto pH y la baja disponibilidad de nutrientes, aunque *Ceratium* puede competir bien con otras especies por su habilidad para buscar las mejores condiciones para su alimentación y fotosíntesis.

Hart y Wargg (2009), señalan a *Ceratium* como componente asociado con el fitoplancton en el verano tardío en los lagos templados oligotróficos, mesotróficos y eutróficos (pero no hipertróficos), aunque es más común encontrarla en los lagos mesotróficos. Asimismo, se le puede asociar con niveles de clorofila por debajo de los 15 $\mu\text{g/L}$. Sus florecimientos ocurren en aguas con altos contenidos de nutrientes. Su abundancia se relaciona con alta concentración de nitrógeno y fósforo total (o SRP), aspecto que contrasta con la antigua percepción de que *Ceratium* era un indicador de aguas claras. Los cambios abruptos inducidos comúnmente por el hombre conducen a condiciones repentinas e inesperadas (estados ecológicos alternativos), que pueden ser poco favorables respecto a los servicios ecológicos evaluados por la sociedad. La identificación de los umbrales ecológicos revela mucho acerca de la mecánica de los procesos de la comunidad acuática que va de la mano con el manejo de los recursos. La reestructuración de las comunidades plantónicas (autotróficas y componentes del zooplancton) asociadas con los repentinos florecimientos de *Ceratium* pueden ser ligadas a los cambios e inestabilidad del estado trófico, reflejando la posibilidad de un cambio umbral trascendente en el ecosistema.

6.6 REFERENCIAS

- ALVA MARTÍNEZ, A. F., S.S.S. SARMA, S. NANDINI, 2007. Population dynamics of *Brachionus calyciflorus* and *Brachionus havanaensis* (Rotifera) on mixed diets with *Microcystis aeruginosa* and green algae. *Hydrobiológica*, vol. 17, Sup. (1): 59-67.
- APHA. 1995. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19th ed. American Public Health Association. American Water Works Association and Water Pollution Control Federation. Washington, DC. 1134 p.
- BONEY, A. D. 1975. *Phytoplankton*. London: Edward Arnold.
- BOURRELLY, P. 1970. *Les algues d'eau douce. Initiation à la Systématique*. Tome III: Les Algues bleues et rouges, Les Eugléniens, Peridiniens et Cryptomonadines. N. Boubée & Cie, Paris, 512 pp.
- CHANTANGSI, CH., 2013. *Pediastrum*. The little star in the pond. Thailand. Disponible en la Web Wise: [http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/artsep01/pediastrum.html](http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/indexmag.html?http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/artsep01/pediastrum.html). Consultado en 2013.
- GALKOVSKAYA, G.A. y I.F. MIYANINA. 1989. Morphological structure and functional patterns of *Keratella cochlearis* (Gosse) populations in stratified lakes. *Hydrobiologia* 186/187: 119 – 128. <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF00048903#page-1>.
- HEANEY S.J. y J.F. TALLING, 1980. *Ceratium hirundinella*—Ecology of complexes mobile, and successful plant. *Review Articles*. Report of The Director. Pp 27 -40.
- KARUTHAPANDI, M., D.V. RAO y HAVIER INNOCENT. 2013. Freshwater rotifers of Andhra Pradesh—Checklist. *International Journal for Life Sciences and Educational Research*. Vol 1(1): 1-13. <http://www.ijlser.com/articles/1MS1001A.pdf>.
- LEE A. 2014. *Bosmina longirostris*. Disponible en la Web Wise: http://animaldiversity.ummz.umich.edu/accounts/Bosmina_longirostris/. Consultado el 19 de febrero de 2014.
- LUJÁN DE FABRICIUS, A., 2013. *Las algas, indicadores de la calidad del agua*. Fac. de Ciencias Exactas del Dpto. de Ciencias Naturales. Disponible en la Web Wise: <http://www.unrc.edu.ar/publicar/intercien/004/dos.htm>
- PAVÓN-MEZA, E.L., S.S.S. SARMA Y S. NANDINI, 2005. Combined effects of algal (*Chlorella vulgaris*) food level and temperatura on the demography of *Brachionus havanaensis* (Rotifera): a life table study. *Hydrobiologia* 546: 353-360. DOI 10,1007/s10750-05-4245-8. http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F1-4020-4408-9_36#page-1
- SARATONOV, A. 1995. Effects of *Microcystis aeruginosa* on interference competition between *Daphnia pulex* and *Keratella cochlearis*. *Hydrobiologia* 307: 117-126. <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF00032003#page-2>

VICENTE, E., C. DE HOYOS, P. SÁNCHEZ, J. CAMBRA. 2005. *Metodología para el Establecimiento del Estado Ecológico según la Directiva Marco del Agua. Protocolos de Muestreo y Análisis para El Fitoplancton*. Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio de Ambiente.

WHITTON, B.A. (2011). Cyanobacteria (Cyanophyta). In: *The freshwater algal flora of the British Isles. An identification guide to freshwater and terrestrial algae*. Second edition. (John, D.M., Whitton, B.A. & Brook, A.J. Eds), pp. 31-158. Cambridge: Cambridge University Press.

http://www.google.com.mx/imgres?imgurl=http://bioref.lastdragon.org/Cyanobacteria/Gloeocapsa_02PM01_12.jpg&imgrefurl=http://bioref.lastdragon.org/Cyanobacteria/Gloeocapsa.html&h=267&w=300&sz=33&tbnid=7hxxZnPfYjM3jM:&tbnh=90&tbnw=101&zoom=1&usq=__neB-b31JfraTG3t68O9ChFKAG1Q=&docid=ZIZWd82o9xYJT-M&sa=X&ei=uqNdUvS7G16gkQfHkoGIBA&ved=0CDAQ9QEwAQ

http://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=52149

https://www.google.com.mx/search?q=limnocalanus&ie=utf-8&oe=utf-8&rls=org.mozilla:es-MX:official&client=firefox-a&channel=sb&gfe_rd=ctrl&ei=B4ILU6HXFKWR8QeYkQE&gws_rd=cr



Tomatal. Fotografía del 16 de septiembre de 2013



Tomatal. Fotografía del 23 de enero de 2014



Laguna de Tuxpan. Fotografía del 16 de septiembre de 2013



Laguna de Tuxpan. Fotografía de la época de secas.



Toxicología y contaminación

EDITORES:

Yolanda Pica Granados,
Ana Cecilia Tomasini Ortiz,
Alfonso G. Banderas Tarabay

CONTENIDO

Capítulo 7

7.1 INTRODUCCIÓN	252
7.2 ÁREA DE ESTUDIO	257
7.3 MÉTODOS	258
7.3.1. Muestreo para análisis de plancton y evaluación de microcistina.	259
7.3.2. Muestreo para análisis de contaminantes y evaluación de toxicidad	259
7.3.3. Metales Pesados	260
7.3.4. Compuestos orgánicos	261
7.3.5. Evaluación de la toxicidad	261
7.3.6. <i>Vibrio fischeri</i>	262
7.3.7. <i>Daphnia magna</i>	262
7.3.8. <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i> (<i>Selenastrum capricornutum</i>)	262
7.3.9. Evaluación de microcistina	263
7.3.10. Análisis químico de contaminantes	264
7.3.10.1. Análisis toxicológico	264
7.4 RESULTADOS	265
7.4.1. Contaminantes químicos orgánicos e inorgánicos	265
7.4.2. Metales pesados	265
7.4.3. Compuestos orgánicos	268
7.4.4. Pruebas de toxicidad	280
7.4.4.1. Pruebas de toxicidad aguda	280
7.4.5. Fitoplancton y microcistina	281
7.4.5.1. Muestreo de lluvias	281
7.4.5.2. Muestreo en secas (estiaje)	283
7.5 DISCUSIÓN	286
7.6 CONCLUSIONES	291
7.7 REFERENCIAS	294

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 7.3.1. Localización de la Laguna de Tuxpan, Gro. (modificada de IMTA 2013).	257
Figura 7.4.1. Sitios considerados para el muestreo de metales pesados, contaminantes orgánicos y evaluación de la toxicidad (modificada de IMTA 2013).	266
Figura 7.4.2. Resumen de la distribución del fitoplancton en el lago (modificada de IMTA 2013).	282
Figura 7.4.3. Probabilidad relativa de efectos agudos para la salud de acuerdo al número de cel/mL de cianofitas (modificada de IMTA 2013).	282
Figura 7.4.4. Probabilidad relativa de efectos agudos para la salud de acuerdo los microgramos por litro de clorofila a (modificada de IMTA 2013).	283
Figura 7.4.5. Resumen de la distribución del fitoplancton en el lago (modificada de imta 2013).	284
Figura 7.4.6. Comparación del número total de células por mililitro del fitoplancton en los periodos de lluvia y secas en el lago (modificada de IMTA 2013).	284
Figura 7.4.7. Comparación del número total de células por mililitro del fitoplancton en los periodos de lluvia y secas en el lago (modificada de IMTA 2013).	285
Figura 7.4.8. Comparación del número total de células por mililitro del fitoplancton en los periodos de lluvia y secas en el lago (modificada de IMTA 2013).	285

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 7.1.1. Variedades de cianotoxinas, órganos blanco, efectos y organismos que las contienen.	254
Cuadro 7.3.1. Localización de los sitios dentro del lago Laguna de Tuxpan, Guerrero.	258
Cuadro 7.3.2. Localización de los sitios dentro del lago Laguna de Tuxpan, Guerrero.	260
Cuadro 7.3.3. Valores guía de la OMS para la probabilidad relativa de efectos agudos para la salud, durante la exposición a cianobacterias y microcistina en aguas destinadas para el consumo humano y recreación.	263
Cuadro 7.4.1. Metales pesados detectados en agua y sedimentos de la Laguna Tuxpan, Guerrero.	267
Cuadro 7.4.2. Contaminantes orgánicos detectados en agua y sedimentos de la Laguna Tuxpan, Guerrero.	268
Cuadro 7.4.3. Compuestos orgánicos detectados mediante el barrido cromatográfico durante el muestreo de lluvias (sitio e-2)	269
Cuadro 7.4.4. Compuestos orgánicos semivolátiles (COSV) en la Laguna de Tuxpan durante el muestreo de secas. Resultados del barrido cromatográfico.	271
Cuadro 7.4.5. Resultados de pruebas de toxicidad aguda en agua de la Laguna de Tuxpan.	280

7.1 INTRODUCCIÓN

Las economías de escala requieren de la producción masiva, basada en la explotación de los recursos naturales, y amenazan la integridad y estabilidad de los ecosistemas con riesgo de colapsarlos, comprometiendo la salud y calidad de vida de las especies, incluyendo al hombre. El avance económico e industrial de México ha alterado el entorno natural del territorio, lo que afecta tanto a los recursos asociados al ciclo hidrológico como a los ecosistemas acuáticos. La continua degradación de suelo, aire y agua exige contar con estudios que permitan conocer el grado de afectación de los ecosistemas, abarcando todos los aspectos posibles de manera que la información generada contribuya al mejoramiento de los criterios ecológicos desarrollados, y las acciones necesarias para proteger la calidad del agua y a los organismos que la habitan.

El análisis del problema en los diagnósticos puede abordarse mediante la identificación de efectos a nivel molecular, de especies, o asociaciones sensibles, ecosistema, etc., determinando la diversidad y abundancia de tóxicos químicos que persisten en el ecosistema.

En México hay una gran diversidad de especies y ecosistemas acuáticos que han sido alterados desde el descubrimiento de la agricultura en Mesoamérica. Sin embargo, la alteración se ha diversificado y agudizado durante el siglo pasado debido a la demotecnia (Vallentyne 1972), requiriéndose ampliar los aspectos ambientales que deben estudiarse.

Las diversas actividades humanas, como la agricultura, la ganadería, la industria, la urbanización y el turismo, producen gran variedad de contaminantes de alto riesgo (Montero y Arellano 2009), que presentan cierta movilidad ambiental y pueden limitar los usos recreativos o pesqueros de los cuerpos de agua, además de limitar la calidad del ambiente al deteriorar la diversidad acuática. Asimismo, pueden eventualmente producir enfermedades en las poblaciones humanas usuarias, como fue el caso en los campos de cultivo y áreas naturales

protegidas de los Estados Unidos en los años 60's, debido a la amplia dispersión de plaguicidas en el ambiente, su acumulación en los tejidos vivos y los efectos sobre la reproducción de las especies y la salud de los niños (Carson 2002), cuya denuncia dio origen al Movimiento Ecologista de Estados Unidos y posteriormente a la Environmental Protection Agency (EPA), de donde México toma su legislación en materia ambiental.

La Laguna de Tuxpan es un cuerpo de agua pequeño del cual se beneficia la población asentada en su rivera realizando actividades domésticas como el lavado de ropa y automóviles, la limpieza de restaurantes, la pesca, la recreación y deportes náuticos como la "Nauticopa". Además, está rodeada de huertas, principalmente de mango, ciruela, sandía y melón, algunos para la exportación. También se emplea como abrevadero in situ, y para pequeñas granjas.

Los antecedentes en materia de contaminación se reducen a notas periodísticas y a lo señalado por el "Plan Rector de Producción y Conservación de la Microcuenca Tuxpan". Las principales fuentes de contaminación al lago son los escurrimientos de las barrancas de El Tomatal, los Tepetates y Platanillo, las aguas negras de la Comunidad de Tuxpan y del Penal de Iguala, que desembocan en el lago.

Algunos trabajos presentados en congresos señalan que la presa Valerio Trujano aporta sus aguas a través de la barranca de El Tomatal. Esta presa recibe aportes de río Huitzucó, el cual presenta aportes de metales pesados, en especial de Arsénico (Ramírez-Guzmán et al. 2007). También se señala la eventual mortandad de peces y una progresiva disminución de la presencia de aves y reptiles.

Por otra parte, muchos cuerpos de agua están sujetos a la eutrofización antropogénica asociada con el incremento en la cantidad de fósforo y nitrógeno disueltos en el agua, que se manifiesta mediante el cambio en la apariencia y la calidad del agua en los cuerpos eutróficos e hipertróficos, en condiciones ambientales que abaten la diversidad del fitoplancton y favorecen la proliferación de cianobacterias, y las cianotoxinas asociadas (Ramírez-García et al. 2004; Tabla 7.1.1).

Cuadro 7.1.1 Variedades de cianotoxinas, órganos blanco, efectos y organismos que las contienen.

Toxina	Órgano que ataca	Género de Cyanobacteria
Ciclo Péptidos		
Microcistina	Hígado	<i>Microcystis</i> <i>Anabaena</i> <i>Oscillatoria</i> <i>Nostoc</i> <i>Hapalosiphon</i> <i>Anabaenopsis</i>
Nodularina	Hígado	<i>Nodularia</i>
Alcaloides		
Anatoxina-a	Sistema nervioso	<i>Anabaena</i> <i>Oscillatoria</i> <i>Aphanizomenon</i>
Anatoxina-a(S)	Sistema nervioso	<i>Anabaena</i>
Aplixiatoxina	Piel	<i>Lyngbya</i> <i>Schizotrix</i> <i>Oscillatoria</i>
Cilindrospermopsina	Hígado	<i>Cilindrospermopsis</i> <i>Aphanizomenon</i> <i>Umezakia</i>
Lyngbyatoxina-a	Piel y tracto gastrointestinal	<i>Lyngbya</i>
Saxitoxina	Sistema nervioso	<i>Anabaena</i> <i>Aphanizomenon</i> <i>Lyngbya</i> <i>Cilindrospermopsis</i>
Lipopolisacáridos	Irritante por exposición en tejidos	Todas

Fuente: Modificada de IMTA 2013.

Las cianotoxinas incluyen varios grupos de sustancias químicas que intoxican a los vertebrados con mecanismos concretos que incluyen desde las neurotoxinas fuertes (anatoxina, saxitoxina); las que son tóxicas para el hígado (microcistina, nodularina y cylindrospermopsina); y otros que parecen causar problemas de salud como la gastroenteritis (lipopolisacáridos). Estas toxinas han sido implicadas con la muerte de animales y en problemas relacionados a la salud humana (Tomasini-Ortiz et al. 2012a).

La Paleontología cataloga a las cianobacterias dentro de los organismos más antiguos, que forman grandes colonias en agua con alto contenido de nutrientes o grado trófico avanzado (Roset et al. 2001). Se les consideran un eslabón entre procariotas y eucariotas fotosintéticos, o sea, organismos unicelulares sencillos que sintetizan clorofila a como pigmento fotosintético primario, y fotosintetizan usando la luz solar (OMS 1998). Presentan características de bacterias Gram positivas con pared celular tipo procariota, ausencia de membrana nuclear y de organelos subcelulares (cianoprocarioritas; Quesada et al. 2006).

Pueden ser unicelulares (*Chroococcus spp.*) y formar colonias envueltas con una capa de mucilago (*Microcystis spp.*), o formar filamentos (*Anabaena spp.*; Quesada et al. 2006; Canter-Lund y Lund 1996). Ciertas particularidades las unen con las bacterias y las algas, por ejemplo su antigüedad evolutiva, su metabolismo aeróbico y su carácter fotoautótrofo (liberan oxígeno en la fotosíntesis); presentan una especial facilidad de crecimiento y sus pigmentos auxiliares son las ficobiliproteínas (Bryant 1986; Pérez et al. 2008), como la ficobilina y la ficocianina, que les confieren el color característico que ha dado lugar a la denominación de algas verde-azules o cianofíceas (Tomasini-Ortiz et al. 2012a).

Al margen de su toxicidad, la consecuente descomposición aerobia de la biomasa de un afloramiento masivo de cianobacterias, tiene como consecuencia inmediata la disminución del oxígeno disuelto, que a su vez abate la biodiversidad acuática, afectando la integridad ecológica del cuerpo de agua. La presencia de la toxina puede modificar la estructura y composición de especies del zooplancton sensibles a dichas toxinas, seleccionando a las más resistentes. Si estas tienen un valor nutricional diferente, o no sirven de alimento a los peces, se desequilibra la estructura trófica del ecosistema. Se ha comprobado que las toxinas se acumulan

en los tejidos de algunos animales que las ingieren (vertebrados e invertebrados), dando origen al proceso de biomagnificación, o acumulación de toxinas, que circularán por la red trófica debido a la depredación de unos organismos por otros, los cuales pueden morir por la acumulación de toxina (Alonso-Andicoberry et al. 2002).

Además, los afloramientos masivos de cianobacterias conducen a la disminución de la calidad del agua y de sus valores estéticos (olor, color y sabor), lo que demerita su uso turístico y/o recreativo (Tomasini-Ortiz et al. 2012b), o para el riego, ya que obstruye las válvulas y los aspersores, o para la potabilización al obstruir y colmatar los filtros (Quesada et al. 2006).

La población de Tuxpan vive principalmente de la pesca y del turismo asociado a un lago que padece la contaminación de compuestos orgánicos e inorgánicos así como de la eutrofización antropogénica. Por lo mismo, en este estudio se determina la contaminación química y biológica de la Laguna de Tuxpan, mediante la identificación y cuantificación de las principales fuentes de deterioro ambiental a través de los contaminantes orgánicos y metales pesados, se analiza la relevancia ecológica de los contaminantes mediante la evaluación de sus efectos tóxicos, se determina la concentración de MC-LR por el método de ELISA, y se evalúan los riesgos para la salud humana y el límite máximo de detección, con base en las guías descritas por la OMS.

7.2 ÁREA DE ESTUDIO

El lago “Laguna de Tuxpan”, se encuentra localizado al sureste del municipio de Iguala entre los paralelos $18^{\circ} 21' 43.96''$ y $18^{\circ} 21' 22.31''$ de latitud Norte, y $99^{\circ}30' 9.97''$ y $99^{\circ}28' 45.12''$ de longitud Oeste. Forma parte de la región norte del estado; tiene una longitud de 2.75 km y un ancho máximo de 2.23 km. En su vecindad se ubica el pueblo de Tuxpan, con una población de 2,086 personas. Es un lago de origen tectónico formado en una depresión, o subsidencia, de la corteza terrestre (Wetzel 2001). Según el informe “Reservas de la Biósfera y otras Áreas Protegidas de México” (1995), el lago está catalogado como Presa Laguna de Tuxpan, con fecha de Decreto del 3 de agosto de 1949, con categoría de Zona Protectora Forestal (ZPF), y superficie de 364.56 ha.

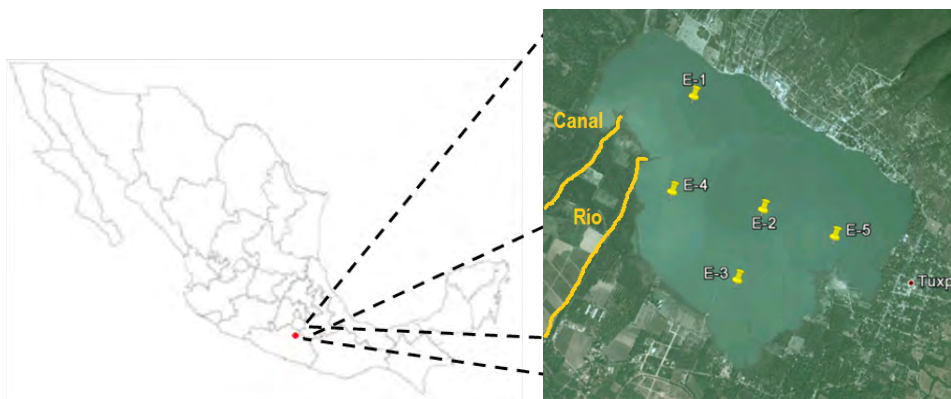


Figura 7.2.1 Localización de la Laguna de Tuxpan, Gro. (Modificada de IMTA 2013)

7.3 MÉTODOS

Se establecieron cinco sitios de muestreo (E-1, E-2, E-3, E-4, E-5) en el lago (Figura 7.2.1 y Cuadro 7.3.1). Los muestreos se llevaron a cabo durante la época de lluvias y de secas. El sitio E-5 contó con dos submuestras por ser la más profunda, una de superficie y una de fondo, que en total sumaron seis registros fisicoquímicos y biológicos para el lago. El trabajo de campo, colecta y análisis de muestras, se realizó en su totalidad en apego al sistema de aseguramiento de la calidad vigente en el laboratorio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (Anexo 1).

Cuadro 7.3.1 Localización de los sitios dentro del lago Laguna de Tuxpan, Guerrero

Sitio	Nombre de el sitio	Descripción	Longitud norte	Latitud oeste
E-1	Seno noroeste	Cerca de la salida del Canal de Llamada	18° 21' 44.5"	99° 29' 44.2"
E-2	Centro	En el centro del lago de acuerdo con su morfología	18° 21' 16.1"	99° 29' 25.9"
E-3	Sur	Ubicado cerca del primer muelle, al sur del cuerpo de agua	18° 20' 58.5"	99° 29' 32.7"
E-4	El Tomatal	Frente a la entrada del río El Tomatal	18° 21' 20.6"	99° 29' 49.9"
E-5	Seno este	Frente al poblado de Tuxpan	18° 21' 09.3"	99° 29' 07.0"

Fuente: Modificada de IMTA 2013.

7.3.1. Muestreo para análisis de plancton y evaluación de microcistina.

El plancton se recolectó en cada sitio, dependiendo de la densidad, mediante el arrastre (uno a tres minutos de una red de 76 micras de malla). Las muestras se fijaron con formol al 4% para la identificación y conteo de las especies. Las muestras simultáneas para determinar la MC-LR se extrajeron con un frasco de 1 L, al que se le agregó lugol. Las muestras se guardaron protegidas de la luz en hieleras a 4 °C.

Se colocó 1 mL de muestra en una celda Sedgwick-Rafter para analizarla bajo el microscopio de luz con un aumento de 40x, para identificar a las especies y contar a sus individuos. Se realizaron tres lecturas por cada control. El promedio se obtuvo dividiendo el número de organismos contados entre el número de lecturas efectuadas, aplicando la fórmula de Lackey y reportando los resultados en células/mL (APHA, 2005). La MC-LR se determinó mediante la prueba ELISA, con un kit de Abraxis®, ADDA ELISA, con control negativo (CN) y seis controles de 0.0, 0.15, 0.4, 1.0, 2.0 y 5.0 µg.

7.3.2. Muestreo para análisis de contaminantes y evaluación de toxicidad

El muestreo se realizó a bordo de una lancha, las muestras de agua se obtuvieron sumergiendo las botellas 50 cm debajo de la superficie hasta llenarlas. Las de sedimento con una draga y transfiriéndolas a frascos y bolsas plásticas. Dependiendo del análisis, su contenido fue tratado para eliminar impurezas.

Para determinar los compuestos orgánicos y metales pesados en el agua, las muestras se extrajeron en los sitios E-1, E-2 y E-3, y de sedimentos en la zona más profunda del lago ubicada en E-2, considerada representativa debido a la dimensión del lago.

Para determinar la toxicidad, se extrajeron muestras de agua en los cinco sitios, y en E-2 se obtuvo también agua del fondo (E-6).

En el Cuadro 7.3.2 se enlistan los contaminantes analizados y las pruebas de toxicidad realizadas en agua y sedimentos. Los compuestos orgánicos se determinaron en su totalidad. Solo en el primer muestreo, a partir de los resultados de septiembre se redujo el número de parámetros y se continuó el análisis empleando solo los compuestos semivolátiles, metales pesados y toxicidad.

Cuadro 7.3.2 Localización de los sitios dentro del lago Laguna de Tuxpan, Guerrero

Parámetro	Método	Matriz		Muestreo	
		Agua	Sedimento	Lluvias	Secas
Compuestos Orgánicos					
Compuestos Orgánicos Volátiles	USEPA 8260B-REV 2, 1996	✓		✓	
Compuestos Orgánicos Semi-volátiles, ácido-base y neutros.	USEPA 8270D-1998	✓	✓	✓	✓
Carbamatos	USEPA 531.1 y 531.2	✓	✓	✓	
Plaguicidas organoclorados	USEPA 8081-1996	✓	✓	✓	
Plaguicidas fosforados	USEPA 8141B-1998	✓	✓	✓	
Bifenilos policlorados	USEPA 8082-1996		✓	✓	
Metales Pesados					
Cd, Cu, Cr, Pb, Zn, Al, As y Hg	NMX-AA-051-SCFI-2001	✓	✓	✓	✓
Toxicidad					
<i>Daphnia magna</i>	NMX-AA-087-SCFI-2010	✓		✓	✓
<i>P. subcapitata</i> (<i>S. capricornutum</i>)	USEPA 600/4-90/027, 1994	✓		✓	✓
<i>Vibrio fischeri</i>	NMX-AA-112-SCFI-1995	✓		✓	✓

Fuente: IMTA 2013

7.3.3 Metales Pesados

La determinación de los metales pesados se efectuó por Absorción Atómica (AA) de llama (Cr, Pb, Cd, Zn y Cu). En caso del As y Hg se empleó el acople AA-Generador de Hidruros. Los sedimentos y las muestras acuosas se prepararon a través de digestión ácida con ayuda de un equipo de microondas (Standard Methods 3111B y 3111D).

7.3.4 Compuestos orgánicos

Para la detección de Compuestos orgánicos volátiles se empleó la técnica de cromatografía de gases-masas (CG-Masas) con acople a purga y trampa para la lectura directa.

Para la determinación de los compuestos orgánicos semivolátiles se efectuó una extracción de ácidos bases y neutros poniendo a reflujo el sistema Soxhlet por espacio de 18 h. El sedimento seco, molido y tamizado, se colocó en empaques de papel filtro prelavado, para posteriormente colocarlos en reflujo con cloruro de metileno hasta el término del periodo mencionado. Posteriormente la muestra se concentró por evaporación y se purificó a través de cromatografía en columna con empaque de Fluorisil.

Para la cuantificación de compuestos volátiles y semivolátiles se emplearon los métodos 8260B y 8270D, respectivamente y adicionalmente se efectuaron barridos cromatográficos cualitativos que permiten la identificación de otros compuestos no convencionales o de sustancias clasificadas como emergentes. Los barridos se efectuaron en modo scan para la identificación de iones específicos. Los picos resueltos en el cromatograma y en el espectro de masas fueron contrastados con la información de la biblioteca de identificación del propio equipo y se consideraron como presencias positivas aquellos compuestos con probabilidad de similitud mayor al 90%.

Para el caso de los Plaguicidas Organoclorados y Bifenilos Policlorados, se empleó CG con detector de Captura de Electrones; y para los plaguicidas organofosforados, CG con detector específico NPD. Los carbamatos se evaluaron por Cromatografía de líquidos (HPLC) con posterior derivación química por columna.

7.3.5 Evaluación de la toxicidad

Para el análisis de toxicidad se aplicó una batería de pruebas con organismos representantes de diversos niveles tróficos, siguiendo los protocolos basados en normas

de la SECOFI, así como regulaciones internacionales. La batería para la evaluación de la descarga se constituyó por tres especies de prueba: el cladóceros *Daphnia magna* (NMX SCFI-NMX-AA-087-2010), la microalga *Pseudokirchneriella subcapitata*, antes *Selenastrum capricornutum* (US. EPA 1994. 600/4-90/027) y la bacteria *Vibrio fischeri* (SCFI-NMX-AA-112-1995; Cuadro 7.3.2). Los valores que representan la toxicidad se reportan como $CL_{50}/CE_{50}/CI_{50}$ y sus correspondientes Unidades de Toxicidad ($UT = 100 / CL_{50}, CE_{50}, \text{ o } CI_{50}$).

7.3.6 *Vibrio fischeri*

La prueba con *Vibrio fischeri* (bacteria) se realizó acorde al protocolo para “Análisis de toxicidad en fase líquida” aprobado por la normatividad nacional (NMX-AA-112-1995-SCFI; Env. Canada 1992). El método detecta la emisión luminosa generada por el microorganismo de prueba durante la respiración. Cuando la respuesta de las bacterias es óptima, ante la ausencia de agentes tóxicos, el valor de la luminiscencia será de 90 a 100%. En caso de que este valor se reduzca, se estará detectando la presencia de tóxicos, los cuales al integrarse a la célula bacteriana alteran su metabolismo y en consecuencia la emisión luminosa (Bulich 1979; 1981; Ansar et. al. 1998).

7.3.7 *Daphnia magna*

La determinación de la toxicidad con el cladóceros *Daphnia magna*, se realizó siguiendo los protocolos definidos en la Norma Mexicana NMX-AA-087-2010-SECOFI, utilizando organismos con menos de 24 h de nacidos (neonatos), los cuales son expuestos por un periodo de 48 h a la solución de prueba, posteriormente se cuantifica el número de organismos inmovilizados o muertos. El porcentaje de letalidad es calculado en términos porcentuales respecto al número de organismos vivos en el lote control.

7.3.8 *Pseudokirchneriella subcapitata* (*Selenastrum capricornutum*)

La prueba con microalgas se realizó siguiendo el método publicado por Blaise et al. (2000). El método detecta la toxicidad de la muestra sobre la comunidad fitoplanctónica empleando como organismo indicador a *P. subcapitata*, un excelente representante de los productores primarios de los sistemas acuáticos. A partir de los cambios del crecimiento de su población, es posible detectar la carga contaminante en una muestra y obtener la concentración eficaz que reduce al 50% (CE₅₀) el número de células algales que la población debe alcanzar en un periodo de 72 h. Esta misma prueba brinda información relevante sobre el grado de eutroficación del embalse en caso de que el efecto no se manifieste como un retardo o disminución del crecimiento de la población, sino al contrario, un desarrollo excedido de su tendencia normal (Coullard 1993).

7.3.9 Evaluación de microcistina

La Organización Mundial de la Salud (OMS), determinó valores guías relativos a la cantidad permisible de cianobacterias y concentraciones de Microcistina-LR (MC-LR), presentes en agua destinada al consumo humano y la recreación (Cuadro 7.3.3).

Cuadro 7.3.3 Valores guía de la OMS para la probabilidad relativa de efectos agudos para la salud, durante la exposición a cianobacterias y microcistina en aguas destinadas para el consumo humano y recreación

Probabilidad relativa de efectos agudos a la salud	Cianobacterias (Células/mL)	Microcistina-LR	Clorofila a (µg/L)
Baja	< 20,000	<10	< 10
Moderada	20,000 – 100,000	10 - 20	10 – 50
Alta	100,000 – 10,000,000	20 – 2,000	50 – 5,000
Muy alta	> 10,000,000	> 2,000	> 5,000

Fuente: Chorus y Bartram (1999)

Estas guías fueron diseñadas con un criterio mínimo de dominancia de cianobacterias, para muestras donde *Microcystis* sp. es dominante y el contenido de microcistina (MC) es de 0.2 picogramos por célula de *Microcystis*, o 0.4 µg de MC por µg de clorofila a. Al mismo tiempo, la OMS ha decretado un límite máximo de MC para agua potable de 1µg/L (Chorus y Bartram 1999).

7.3.10 Análisis químico de contaminantes

Una vez obtenida la información, se efectuó el análisis de cada sustancia detectada para determinar su origen a partir del reconocimiento de las fuentes posibles, sean antropogénicas o biogénicas. El análisis se amplió a la consulta de bases de información (TOXNET, ECOSAR) para obtener detalles sobre sus propiedades químicas, biodegradabilidad, potencial de bioacumulación y efectos biológicos relacionados a cada compuesto, para ello se empleó el número de CAS y las sinonimias asignadas a cada compuesto.

7.3.11 Análisis toxicológico

Los efectos observados con cada organismo de prueba para cada una de las concentraciones preparadas a partir de diluciones secuenciales de la muestra original, se relacionan para obtener la expresión matemática de su comportamiento y así mismo para efectuar el cálculo que permite obtener la CL_{50} , CE_{50} o CI_{50} , según sea el caso. Para ello se empleó el programa Probit.

7.4 RESULTADOS

7.4.1 Contaminantes químicos orgánicos e inorgánicos

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a los muestreos efectuados el 18 de septiembre del 2013, tres días después de haber ocurrido la tormenta tropical Manuel, que afectó gran parte del estado de Guerrero, y el 04 de enero en época de secas, cuando el nivel del agua en el lago decrece y las cargas contaminantes tienden a concentrarse. Este último muestreo permite definir más claramente la problemática que afecta al lago, ya que permite identificar con mayor facilidad las sustancias que se aportan y que pueden ser indicativas de las fuentes antropogénicas específicas de contaminación, y evaluar la condición más crítica del ambiente y la persistencia de los efectos en el sistema.

Los métodos para determinar metales pesados y una variedad de compuestos orgánicos volátiles (COV) y semivolátiles (COSV), por extracción ácida y básica, y analizar los niveles de contaminación en el lago de Tuxpan durante la época de lluvias se incluyen en el Cuadro 7.4.1. Los análisis se efectuaron en muestras de agua en tres de los sitios de muestreo establecidos para el desarrollo de este estudio (Figura 7.4.1). En el sitio E-2, ubicado en el centro del lago, se tomó una muestra de sedimento para realizar los mismos análisis exceptuando los compuestos volátiles, que fueron excluidos debido a su baja persistencia e incidencia en sedimentos de los ambientes acuáticos.

7.4.2 Metales pesados

Entre los metales pesados se incluyó al plomo (Pb) en los distintos sitios de muestreo. En dos sitios se amplió el análisis para incluir al Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Mercurio (Hg) y Zinc (Zn). Los sedimentos se analizaron solo en el sitio más profundo del lago (E-2 fondo). Los resultados de ambos

muestreros indican que no hay metales en el agua, o están en cantidad menor al límite de detección (Tabla 7.4.1). Solo el arsénico presentó niveles cuantificables, pero su contenido es menor al límite establecido en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECCA, 1989) para cuerpos de agua dulce empleados como fuentes de abastecimiento (0.05 mg/L), para riego agrícola (0.1 mg/L) o para la protección de la vida acuática (0.2 mg/L).

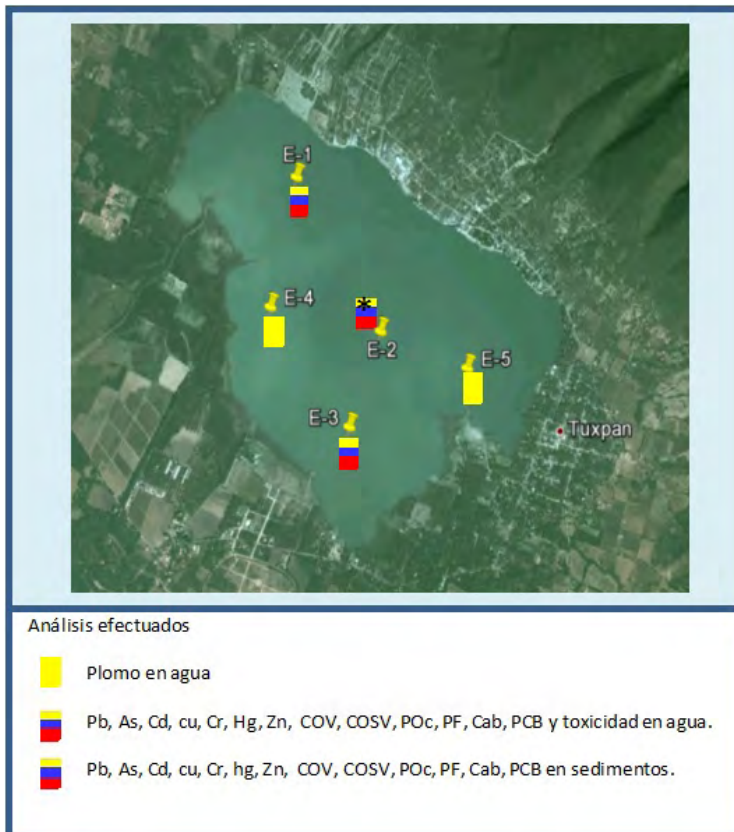


Figura 7.4.1 Sitios considerados para el muestreo de metales pesados, contaminantes orgánicos y evaluación de la toxicidad (modificada de IMTA 2013).

Cuadro 7.4.1 Metales pesados detectados en agua y sedimentos de la Laguna Tuxpan, Guerrero.

Sitio	As	Pb	Cd	Cu	Cr	Hg	Zn
LLUVIAS							
Análisis en Agua (mg/L)							
E1	<0.0010	<0.005	<0.001	<0.05	<0.005	<0.001	<0.10
E2	-	<0.005	-	-	-	-	-
E3	<0.0010	<0.005	<0.001	<0.05	<0.005	<0.001	<0.10
E4	-	<0.005	-	-	-	-	-
E5 superficie	-	<0.005	-	-	-	-	-
E5 fondo	-	<0.005	-	-	-	-	-
Análisis en Sedimento (mg/kg)							
E2 ^b	0.228	12.091	< 2	23.623	12.01	<0.1	64.151
SECAS							
Análisis en Agua (mg/L)							
E1	0.0022	<0.005	<0.001	<0.05	<0.005	<0.001	<0.10
E2	-	<0.005	-	-	-	-	-
E3	0.0020	<0.005	<0.001	<0.05	<0.005	<0.001	<0.10
E4	-	<0.005	-	-	-	-	-
E5 superficie	-	<0.005	-	-	-	-	-
E5 fondo	-	<0.005	-	-	-	-	-
Análisis en Sedimento (mg/kg)							
E2 ^b	0.2662	28.673	2.976	34.715	24.598	0.2769	82.326

a) Criterio Límite CECCA-001-1989 para agua 0.20 mg/L; b) Limite en sedimentos para no generar efectos agudos (Guía NOAA, Squirt 2010. and Guidelines for protection and management of aquatic sediment quality in Ontario Canada, 1993), para As=33, Pb=250, Cd= 10, Cu= 110, Cr= 110, Hg= 2, Zn= 820mg/kg.

Fuente: IMTA 2013.

7.4.3 COMPUESTOS ORGÁNICOS

Los compuestos orgánicos que incluyen plaguicidas organoclorados, fosforados, carbamatos, compuestos orgánicos volátiles y compuestos orgánicos semivolátiles, analizados tanto por los métodos de cuantificación 8260B y 8270D, como los identificados en el análisis de barrido, estuvieron ausentes durante la época de lluvias, o en niveles por debajo del nivel de detección de la técnica (Cuadro 7.4.2).

Cuadro 7.4. 2 Contaminantes orgánicos detectados en agua y sedimentos en la Laguna Tuxpan, Guerrero.

	Análisis en agua			Análisis en sedimentos mg/Kg	
	E1	E2	E3	E2	Descargas. Municipales
COV (8260B)	ND	ND	ND	ND	
COSV (8270D)	ND	ND	ND	Dimetilftalato	0.56
				Dibutilftalato	0.07
				Etil hexil ftalato	0.48
Plaguicidas Organoclorados	ND	ND	ND	ND	
Plaguicidas Fosforados	ND	ND	ND	ND	
Carbamatos	ND	ND	ND	ND	
Bifenilos policlorados	ND	ND	ND	ND	

Fuente: IMTA 2013.

En el análisis cuantitativo de Compuestos Orgánicos Semivolátiles del sedimento del sitio E-2, estuvieron ausentes la mayoría de estos contaminantes, con la excepción de los ftalatos Dimetilftalato, Dibutilftalato y Etilhexilftalato (Tabla 7.4.2), que se identificaron con el análisis de barrido.

El barrido cromatográfico detectó mayor número de compuestos en los sedimentos que en el agua, debido a que las sustancias tienden a acumularse y permanecer en este ámbito, más estable que la columna de agua a los cambios del clima. Su presencia puede emplearse como indicadora molecular del origen de la materia orgánica (Grigoriadou et al. 2008). En este sentido, el Cuadro 7.4.3

muestra 33 moléculas encontradas en los sedimentos, 18 de las cuales son alcanos y cicloalcanos que se encuentran en una gran variedad de animales y plantas que constituyen las fuentes endógenas de materia orgánica, y dado que estas fuentes forman parte de la composición del petróleo, pueden estar también presentes en sus productos derivados.

Los otros 15 compuestos enlistados en el Cuadro 7.4.3, son hidrocarburos aromáticos, ácidos grasos, ésteres, ftalatos, esteroides y alquenos asociados a fuentes antrópicas como las descargas residuales municipales y la contaminación fecal, principalmente (Aguayo et al. 2004; Ellen et al. 2006). Estas sustancias se emplean como aditivos de alimentos industrializados, aromatizantes en productos de cuidado personal, forman parte de jabones y detergentes como saponificantes y también son constituyentes naturales de productos farmacéuticos.

Cuadro 7.4.3 Compuestos orgánicos detectados mediante el barrido cromatográfico durante el muestro de lluvias (sitio E2")

Nombre	CAS	Producto Orgánico Natural	Descargas Municipales	Especificaciones de Origen
Ácido Hexadecanóico	000057-10-3		✓ ✓ ✓	
Ácido Octadecanóico	000057-11-4			Aditivo en productos alimentarios
1,2 Ácido benzénico dicarboxílico	001330-96-7			
1,3-Ditiolano	004829-04-3		✓	Derivado Natural de uso farmacéutico
Ácido Hexadecanóico 2-oxo	055836-30-1		✓	Saponificante de uso en formulación de tensoactivos, jabones y detergentes
Ciclopentadecanona	004727-18-8		✓	Aromatizante en perfumería y productos de cuidado personal (PCP)
Colestan-4-en-3 ona	000601-57-0		✓	Indicador químico de fecalismo humano, origen descargas municipales
Ácido ftálico dodecil ester	000084-77-5		✓	ftalato. Plastificante de polímeros
Ácido ftálico butilester	000085-70-1		✓	
Ácido fosfónico dioctadecil	019047-85-9		✓	Ester. Aditivo de polímeros

Nombre	CAS	Producto Orgánico Natural	Descargas Municipales	Especificaciones de Origen
Fenantreno	055334-01-5		✓	HAP de combustibles, aceites y derivados del petróleo
1,2,3,4-Tetrahidronaftaleno	000475-03-6		✓	
Heptadeceno	006765-39-5	✓	✓	Origen natural/residuos alimentarios
9-Tricoseno	027519-02-4	✓	✓	
1,1'-Oxibis Octano	000629-82-3	✓	✓	Origen natural / productos derivados del petróleo
Heptadecano	000629-78-7	✓	✓	
Eicosano	000112-95-8	✓	✓	
Heptadecano	054833-48-6	✓	✓	
Oxaciclohexadecano	004459-57-8	✓	✓	
1-Octadecano	000112-88-9	✓	✓	
Nonadecano	000629-92.5	✓	✓	
2-Metil tricosano	01928-30-9	✓	✓	
Ciclopentadecano	000295-48-7	✓	✓	
Hexatriacontano	000630-06-8	✓		
Ciclotetradecano	000295-17-0	✓	✓	
Ciclohexadecano	000295-65-8	✓	✓	
1- Nonadeceno	0184356-45-5	✓	✓	
Etil cílcodcano	028981-49-9	✓	✓	
Tetracontano	007098-22-8	✓	✓	
Hidroximetilciclododecano	001892-12-2	✓	✓	
Pentatricontano	006971-40-0	✓	✓	
Hexadecano	000544-76-3	✓	✓	
5-Eicosano	074685-30-6	✓	✓	

PCP= Productos de cuidado personal

Fuente: IMTA 2013

El análisis de barrido de las tres muestras colectadas durante el estiaje, detectó 158 semivolátiles, 20 de ellos omnipresentes de mayor distribución, seguidos por los que se detectaron en dos de las estaciones y por los que caracterizan a cada sitio en particular (Cuadro 7.4.4).

Los herbicidas sobresalen por su peligrosidad. Se detectaron a la Atrazina (1-Cloro-3-etil amina-5-isopropilamina-2,4,6-triazina) y a su derivado, la

Triazina (4,6-dicloro-N-(2-clorofenil)-1,3,5-triazin-2-amina). La atrazina es el contaminante más común de las aguas subterráneas y superficiales en los EUA. En México su problemática aún no está definida debido a que no es frecuente su evaluación en cuerpos de agua y en fuentes de suministro para consumo.

Se detectaron trazas de intermediarios en la producción de pinturas acrílicas, así como solventes para producir polímeros plásticos, resinas y estireno, esteroides y algunos ácidos grasos poliinsaturados como el Escualeno (similar a la vitamina E), asociados a restos de material biogénico y fecal, ya sea natural o antropogénica.

Cuadro 7.4.4 Compuestos orgánicos semivolátiles (COSV) en la Laguna de tuxpan durante el muestreo de secas. resultados del barrido cromatográfico.

Nombre	CAS	Presencia en			Fuente asociada		Especificaciones de Origen
		E1	E2	E3	P. Orgánico Natural	Descargas. Municipales	
Hexadecanoic acid, methyl ester	112-39-0					√	Intermediario químico en productos de limpieza personal
2,6,6-Trimethyl-2-cyclohexene-1,4-dione	1125-21-9					√	Fragancia de perfumería y productos de cuidado personal (PCP)
7-Oxabicyclo[4.1.0]heptan-2-ol	1192-78-5					√	Componente del tabaco
(Z)-Difluorodiazene	13812-43-6					√	Aditivo en combustibles de alto octanaje
(E)-3(10)-Caren-4-ol	1753-35-1					√	Aceite esencial , fragancia
Tetraborane(10)	18283-93-7					√	Oxidante, intermediario químico ,
Atrazine	1912-24-9					√	Herbicida
1,1'-Biphenyl, 4,4'-dichloro-	2050-68-2					√	Fármaco para la atención de Alzheimer
Geranylgeraniol	24034-73-9				√	√	Origen natural/residuos alimentarios
1,2-Benzenedicarboxylic acid, mono(2-ethylhexyl) ester	4376-20-9					√	Ftalato aditivo de plastificantes y polímeros
2-Pentadecanone, 6,10,14-trimethyl-	502-69-2					√	Fragancia de PCP
Pentadecanoic acid, 14-methyl-, methyl ester	5129-60-2				√	√	Origen natural/residuos alimentarios
Tetradecanoic	544-63-8					√	Aditivo en productos alimentarios

Nombre	CAS	Presencia en			Fuente asociada		Especificaciones de Origen
		E1	E2	E3	P. Orgánico Natural	Descargas. Municipales	
Octadecanoic acid	57-11-4					✓	Aditivo en productos alimentarios
Cholesterol	57-88-5					✓	Esterol, indicador químico de fecalismo humano.
1,3,5-Triazine-2,4-diamine, 6-chloro-N-(1-methylethyl)-	6190-65-4					✓	Producto de degradación de la Atrazina (Herbicida)
4-Ethyl-2-hexynal	71932-97-3					✓	Compuestos aromáticos del tabaco
Squalene	7683-64-9					✓	Origen natural/ residuos alimentarios
Cyclohexanone, 2-chloro-	822-87-7						Aditivo de herbicidas,
Heptadecane, 2,6,10,14-tetramethyl-	18344-37-1					✓	Isoprenoide de origen natural
Hexanedial	1072-21-5					✓	Intermediario en productos farmacéuticos
2,4-Hexadien-1-ol	111-28-4					✓	Fragancia en PCP
Isopropyl Palmitate	142-91-6					✓	Fragancia en PCP
Isopropyl Myristate	110-27-0				✓	✓	Fragancia en PCP
1,6,10,14-Hexadecatetraen-3-ol, 3,7,11,15-tetramethyl-, (E,E)-	1113-21-9				✓	✓	Fragancia en PCP
Dodecanamide	1120-16-7					✓	Aditivo cosmético en PCP. Ácido Graso
2-Piperidinone, N-[4-bromo-n-butyl]-	195194-800					✓	Aditivo en plásticos y polímeros
1H-Imidazole, 1-methyl-5-nitro-	3034-42-2					✓	Intermediario de productos farmacéuticos antibacterianos
Heptadecane	629-78-7					✓	Aditivo en PCP y ceras
Pentane, 2-iodo-2,4-Heptadienal, (E,E)-	637-97-8					✓	Sin información
Propanoic acid, 2-methyl-, 3-hydroxy-2,4,4-trimethylpentyl ester	74367-34-3					✓	Componente de pinturas acrílicas
á-Sitosterol	83-46-5				✓	✓	Esterol de origen vegetal, en productos naturales o residuos de alimento

Nombre	CAS	Presencia en			Fuente asociada		Especificaciones de Origen
		E1	E2	E3	P. Orgánico Natural	Descargas Municipales	
Stigmasterol	83-48-7				√	√	Esterol de origen vegetal , en productos naturales o residuos de alimento
Dodecanoic acid	143-07-7					√	Fragancia/ Aditivo en alimentos
n-Hexadecanoic acid	57-10-3					√	Fragancia / Aditivo en alimentos
Propanoic acid, 2-methyl-, 2,2-dimethyl-1-(2-hydroxy-1-methylethyl)propyl ester	74367-33-2					√	Componente de pinturas acrílicas
3-Cyclohexen-1-ol	822-66-2					√	Intermediario de productos farmacéuticos
Boron trifluoride	2095581					√	Intermediario químico para la polimerización de copolímeros y estireno
4,8,12,16-Octadecate-traen-1-ol, 4,9,13,17-tetramethyl-	0-00-0					√	Intermediario de productos farmacéuticos
cis-Z-à-Bisabolene epoxide	0-00-0					√	Fragancia Aceite esencial,
Sulfurous acid, hexyl tetradecyl ester	0-00-0					√	Surfactante de jabones
Methyl 17-methyl-octadecanoate	0-00-0					√	Saponificante de jabones. Ácido graso
Cyclohexane, methylene-	1192-37-6					√	Fragancia en aromatizante ambiental
Hexadecanoic acid, methyl ester	112-39-0					√	Intermediario químico en productos de limpieza personal
2-Imidazolidinone	120-93-4					√	Intermediario químico en productos de limpieza personal
Butylated Hydroxytoluene	128-37-0					√	Fragancia de perfumería y productos de cuidado personal (PCP)
2(4H)-Benzofurano-ne, 5,6,7a-tetrahydro-4,4,7a-trimethyl-	15356-74-8					√	Componente del tabaco
Phytol	150-86-7					√	Aditivo en combustibles de alto octanaje
1-Docosene	1599-67-3					√	Aceite esencial , fragancia

Nombre	CAS	Presencia en			Fuente asociada		Especificaciones de Origen
		E1	E2	E3	P. Orgánico Natural	Descargas. Municipales	
Undecane, 2,8-dimethyl-	17301-25-6					✓	Oxidante, intermediario químico ,
Formic acid, 2-propenyl ester	1838-59-1					✓	Herbicida
2-Nonenal, (E)-	18829-56-6					✓	Fármaco para la atención de Alzheimer
2-Methylene cyclopentanol	20461-31-8				✓	✓	Origen natural/residuos alimentarios
1-Decanol, 2-hexyl-	2425-77-6					✓	Ftalato aditivo de plastificantes y polímeros
2-Decenal, (Z)-	2497-25-8					✓	Fragancia de PCP
2,4-Decadienal, (E,E)-	25152-84-5				✓	✓	Origen natural/residuos alimentarios
2-Octenal, (E)-	2548-87-0					✓	Aditivo en productos alimentarios
2,5-Dimethylcyclohexanol	3809-32-3					✓	Aditivo en productos alimentarios
Pentadecanoic acid, ethyl ester	41114-00-5					✓	Esterol, indicador químico de fecalismo humano.
Doconexent	6217-54-5					✓	Producto de degradación de la Atrazina (Herbicida)
Hexanoic acid, 2-ethyl-, 1,2-ethanediyl-bis(oxy-2,1-ethanediyl) ester	94-28-0					✓	Compuestos aromáticos del tabaco
7-Oxabicyclo[4.1.0]heptan-2-one	6705-49-3					✓	Origen natural/ residuos alimentarios
Dodecane, 2,7,10-trimethyl-	74645-98-0						Aditivo de herbicidas,
26-Nor-5-cholesten-3-ol-25-one	7494-34-0					✓	Isoprenoide de origen natural
1,2-Benzenedicarboxylic acid, butyl octyl ester	84-78-6					✓	Intermediario en productos farmacéuticos
[1,1'-Bicyclohexyl]-2-one	90-42-6					✓	Fragancia en PCP
1,3-Bis-(2-cyclopropyl,2-methylcyclopropyl)-but-2-en-1-one	0-00-0					✓	Fragancia en PCP
Caryophyllene oxide	1139-30-6				✓	✓	Fragancia en PCP
Trifluoroamine oxide	13847-65-9				✓	✓	Fragancia en PCP

Nombre	CAS	Presencia en			Fuente asociada		Especificaciones de Origen
		E1	E2	E3	P. Orgánico Natural	Descargas Municipales	
4-Penten-2-one	13891-87-7					✓	Aditivo cosmético en PCP. Ácido Graso
1,2-Cyclohexanediol, trans-	1460-57-7					✓	Aditivo en plásticos y polímeros
Tetraallyloxyethane	16646-44-9					✓	Intermediario de productos farmacéuticos antibacterianos
1-Methyl-3-nitropyrazole	54210-32-1					✓	Aditivo en PCP y ceras
4H-1,2,4-Triazol-4-amine	584-13-4					✓	Sin información
1-Penten-3-ol	616-25-1					✓	Componente de pinturas acrílicas
9-Eicosene, (E)-	74685-29-3					✓	Esterol de origen vegetal, en productos naturales o residuos de alimento
Tributyl acetyl citrate	77-90-7					✓	Esterol de origen vegetal, en productos naturales o residuos de alimento
3,5-Dimethylcyclopentene	7459-71-4					✓	Fragancia/ Aditivo en alimentos
11-Hexadecynal	86426-73-5					✓	Fragancia / Aditivo en alimentos
1,3-Dioxol-2-one	872-36-6					✓	Componente de pinturas acrílicas
Calarene epoxide	0-00-0					✓	Intermediario de productos farmacéuticos
Isopinocarveol	0-00-0					✓	Intermediario químico para la polimerización de copolímeros y estireno
trans-5-Methyl-2-isopropyl-2-hexen-1-al	0-00-0					✓	Intermediario de productos farmacéuticos
Milbemycin B, 5-demethoxy-5-one-6,28-anhydro-25-ethyl-4-methyl-13-chloro-oxime	0-00-0					✓	Fragancia Aceite esencial
E-2-Octadecadecen-1-ol	0-00-0					✓	Surfactante de jabones
2,3,3-Trimethyl-2-(3-methylbuta-1,3-dienyl)-cyclohexanone	0-00-0					✓	Saponificante de jabones. Ácido graso
2-[2-[2-(tert-Butyldimethylsilyloxy)ethoxy]ethoxy]ethanol	0-00-0					✓	Fragancia en aromatizante ambiental

Nombre	CAS	Presencia en			Fuente asociada		Especificaciones de Origen
		E1	E2	E3	P. Orgánico Natural	Descargas. Municipales	
18-Nonadecen-1-ol	875753-701					✓	Intermediario químico en productos de limpieza personal
4,8,12-Tetradecatrien-1-ol, 5,9,13-trimethyl-	0-00-0						
Benzoic acid, tetradecyl ester (Carbendazin)	10605-21-7					✓	Plaguicida, fungicida en frutales
4,8,12,16-Octadecatetraen-1-ol, 4,9,13,17-tetramethyl-	0-00-0				✓	✓	Origen natural/ fitoactivo
cis-Z-à-Bisabolene epoxide	0-00-0					✓	Fragancia aceite esencial
Sulfurous acid, butyl tetradecyl ester	0-00-0					✓	Saponificante en PCP
Fumaric acid, ethyl 2-methylallyl ester	110-17-8					✓	Uso farmacéutico en soriasis y biocida en plagas de madera
Phthalic acid, isobutyl octyl ester	0-00-0					✓	Ftalato, aditivo de plastificantes y polímeros
Diepi-à-cedrene epoxide	0-00-0					✓	Fragancia aceite esencial, fragancia
Cyclohexene, 1-methyl-3-vinyloxy-	100144-307					✓	Saborizante aditivo en alimentos
dl-à-Tocopherol	10191-41-0					✓	Antioxidante, residuos alimentarios
1H-Pyrazole, 4,5-dihydro-5,5-dimethyl-4-isopropylidene-	106251-096					✓	Aditivo en PCP, alérgico
p-Xylene	106-42-3					✓	Aromático volátil de gasolinas y lubricantes
Methane, chloromethoxy-Boron trifluoride	107-30-2				✓	✓	Solvente de uso en repelente, polímeros y resinas
Phenol	108-95-2					✓	Desinfectante en PCP y hogar
Octadecanoic acid, ethyl ester	111-61-5					✓	Fragancia en PCP y hogar
Nonanoic acid	112-05-0					✓	Fragancia en PCP y hogar
Decanal	112-31-2						Fragancia en PCP y hogar

Nombre	CAS	Presencia en			Fuente asociada		Especificaciones de Origen
		E1	E2	E3	P. Orgánico Natural	Descargas Municipales	
Ethanol, 2,2'-[oxybis(2,1-ethanedioxy)] bis-	112-60-7					✓	Solvente en plastificantes, lacas y polímeros y surfactante
n-Tridecan-1-ol	112-70-9					✓	Fragancia en PCP y hogar
Benzophenone	119-61-9						Fragancia en perfumes y productos de cuidado personal (PCP)
Octadecanoic acid, 2,3-dihydroxypropyl ester	123-94-4					✓	Aditivo en farmacéuticos, y en cosméticos
Octanal	124-13-0					✓	Fragancia en perfumes y PCP
Diethyltoluamíde	134-62-3					✓	Repelente de insectos
1,3-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester	137-89-3					✓	Ftalato, Producción de poliésteres y resinas
Cholesta-4,6-dien-3-ol, (3á)-	14214-69-8				✓	✓	Esterol natural o de restos de alimentos
1,15-Pentadecanediol	14722-40-8					✓	Intermediario de fragancias y saborizante
2(4H)-Benzofuranone, 5,6,7,7a-tetrahydro-4,4,7a-trimethyl-, (R)-	17092-92-1					✓	Fragancia y saborizante de alimentos
2(5H)-Furanone, 5,5-dimethyl-	20019-64-1					✓	Fragancia en PCP
2-Nonen-1-ol	22104-79-6					✓	Fragancia en PCP
Butanoic acid, 2,3-dimethyl-2-(1-methylethyl)-	23119-04-2					✓	Aditivo y saborizante de alimentos y bebidas
Benzoic acid, 4-ethoxy-, ethyl ester	23676-09-7					✓	Intermediario de plásticos y polietileno
9,12-Octadecadienoic acid, methyl ester, (E,E)-	2566-97-4					✓	Fragancia en PCP y alimentos
Dodecane, 2,6,11-trimethyl-	31295-56-4					✓	Hidrocarburo componente de plásticos
3H-Pyrazol-3-one, 2,4-dihydro-2,4-dimethyl-	3310-38-1					✓	Fármaco veterinario
n-Decanoic acid	334-48-5					✓	Fragancia en PCP
Cholesta-5,22-dien-3-ol, (3á)-	34347-28-9				✓	✓	Esterol, producto natural o restos de alimento

Nombre	CAS	Presencia en			Fuente asociada		Especificaciones de Origen
		E1	E2	E3	P. Orgánico Natural	Descargas Municipales	
1,1'-Biphenyl, 2,4'-di-chloro-	34883-43-7					✓	Aditivo de plásticos, adhesivos y capacitores eléctricos
1,3-Cyclopentadiene, 5-(1,1-dimethylethyl)-	35059-40-6					✓	Manufactura de resinas, alcaloides e insecticidas clorados
1-Hexadecanol	36653-82-4					✓	Aditivo en cosméticos y perfumes
2-Decenal, (E)-	3913-81-3					✓	Fragancia en PCP
Benzene, (1,2-dimethoxyethyl)-	4013-37-0					✓	Aceite esencial
Hexanedioic acid, mono(2-ethylhexyl)ester	4337-65-9					✓	Saponificante de PCP
3-Cyclohexen-1-one, 3,5,5-trimethyl-	471-01-2					✓	Solvente de gomas, resinas y nitrocelulosa
Pentaethylene glycol	4792-15-8					✓	Solvente de aceites y explosivos
Campesterol	474-62-4				✓	✓	Esterol constituyente vegetal
2-Butanone, 3-hydroxy-	513-86-0					✓	Intermediario fragancia y saborizantes
Pentanoic acid, 2-acetyl-4-methyl-, methyl ester	51756-09-3					✓	Intermediario de fragancias y perfumes
Hexadecane	544-76-3					✓	Solventes de combustible diesel
Cantharidin	56-25-7					✓	Fármaco de uso veterinario
Hexane, 2,4-dimethyl-	589-43-5					✓	Componente de gasolinas
2-Hexanone	591-78-6					✓	Solvente en pinturas, lacas y gomas
Phenol, 4-chloro-3-methyl-	59-50-7					✓	Aditivo en pinturas y lacas, germicida
Acetamide	60-35-5					✓	Estabilizador de lacas, plásticos, explosivos
Pentanamide	626-97-1					✓	Intermediario de fármacos
Hexadecanoic acid, ethyl ester	628-97-7					✓	Aditivo de alimentos y bebidas
1-Hexadecanol, acetate	629-70-9					✓	Fragancia en PCP

Nombre	CAS	Presencia en			Fuente asociada		Especificaciones de Origen
		E1	E2	E3	P. Orgánico Natural	Descargas Municipales	
Nonadecane	629-92-5				√		Producto natural
Hexatriacontane 9,12-Octadecadienoic acid, ethyl ester	630-06-8					√	Saponificante en PCP
1-Iodo-2-methylundecane	73105-67-6						Aditivo de alimentos y bebidas
2-Hexyn-1-ol	764-60-3					√	Aromatizante en perfumería y productos de cuidado personal (PCP)
2-Butanone	78-93-3					√	Solvente en producción de plásticos y polímeros
Octadecyl trifluoroacetate	79392-43-1					√	Aditivo en productos farmacéuticos
Vinyl caprylate	818-44-0						Aditivo en PCP
1-Heptadecanol, acetate	822-20-8					√	Solvente de pinturas, adhesivos, plástico y madera
1,2-Benzenedicarboxylic acid	88-99-3					√	Ftalato en productos médicos y PCP
Propanoic acid, 2-methyl-, anhydride	97-72-3					√	Aditivo de fragancias y saborizantes
Phenol, p-tert-butyl-	98-54-4					√	Aditivo en PCP

Fuente: IMTA 2013

7.4.4 PRUEBAS DE TOXICIDAD

7.4.4.1 Pruebas de toxicidad aguda

La Tabla 7.4.5, muestra los resultados del análisis de toxicidad aguda de septiembre. Se observó que el agua del lago no presentó efectos agudos. Sin embargo, la muestra superficial del sitio E-5, a una LC_{50} muy cercana al 100% (89.76%), inhibió el crecimiento de *P. subcapitata*.

En estío, el agua inhibe al 30 % de la población algal. El efecto solo se observa en este sitio y puede deberse a que el lago concentra hidrodinámicamente los contaminantes al formar un giro, y/o a la influencia del lavado de ropa y descargas urbanas en las cercanías. La inhibición pueden causarla los compuestos detectados por el barrido de COSV en niveles muy reducidos, especialmente en estío. Se detectaron unas 150 sustancias, incluyendo Atrazina y Triazina, considerada de alto riesgo, y una variedad de compuestos que incluye principalmente aditivos de productos de cuidado personal y de alimentos procesados y plastificantes.

Cuadro 7.4.5. Resultados de pruebas de toxicidad aguda en agua de la Laguna de Tuxpan.

1° Muestreo. Mes de septiembre de 2013 (lluvias)						
Nombre	Bacteria <i>Vibrio fischeri</i>		Alga <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>		Cladóceros <i>Daphnia magna</i>	
	CE_{50} (%)	UT	CI_{50} (%)	UT	CL_{50} (%)	UT
E1	No detectable	-	No detectable	-	No detectable	-
E2	No detectable	-	No detectable	-	No detectable	-
E3	No detectable	-	No detectable	-	No detectable	-
E4	No detectable	-	No detectable	-	No detectable	-
E5 superficie	No detectable	-	89.76	1.11	No detectable	-
E5 fondo	No detectable	-	No detectable	-	No detectable	-
2° Muestreo. Secas						
Nombre	Bacteria <i>Vibrio fischeri</i>		Alga <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>		Cladóceros <i>Daphnia magna</i>	
	CE_{50} (%)	UT	CI_{50} (%)	UT	CL_{50} (%)	UT
E1	No detectable	-	No detectable	-	No detectable	-

Nombre	2° Muestreo. Secas					
	Bacteria <i>Vibrio fischeri</i>		Alga <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>		Cladócero <i>Daphnia magna</i>	
E2	No detectable	-	No detectable	-	No detectable	-
E3	No detectable	-	No detectable	-	No detectable	-
E4	No detectable	-	No detectable	-	No detectable	-
E5 superficie	No detectable	-	> al 100% *	-	No detectable	-
E5 fondo	No detectable	-	No detectable	-	No detectable	-

*La toxicidad de esta muestra en su condición original produce un efecto inhibitorio en el crecimiento del alga de un 30%, por lo que se indica que hay un efecto tóxico pero no logra el 50% necesario para calcular la CI_{50}

Fuente: IMTA 2013

7.4.5 FITOPLANCTON Y MICROCISTINA

7.4.5.1 Muestreo de lluvias

La Figura 7.4.2, muestra la abundancia de fitoplancton en el lago de Tuxpan. Las áreas coloreadas representan la suma de la densidad de las Divisiones en cada sitio. Se observa que las cianofitas dominan en los sitios E-1, E-2 y E-3, las clorofitas en E-4, y las pirrofitas en E-5.

Acorde con los valores guía de la OMS, por el número de células por mililitro de cianofitas, se observa que en los sitios E-1, E-2 y E-3, existe una probabilidad relativa de efectos agudos para la salud moderada, mientras que los sitios E-4 y E-5 la probabilidad es baja.

Las Figuras 7.4.3 y 7.4.4, al número de cel/mL de cianofitas de acuerdo a los valores guía de la OMS y considerando a los microgramos por litro de clorofila a, en los sitios E-1, E-3, E-4 y E-5, se tiene una probabilidad relativa de efectos agudos para la salud baja, mientras que en el sitio E-2 es moderada. En ninguno de los sitios se detectó la toxina por el método ELISA.

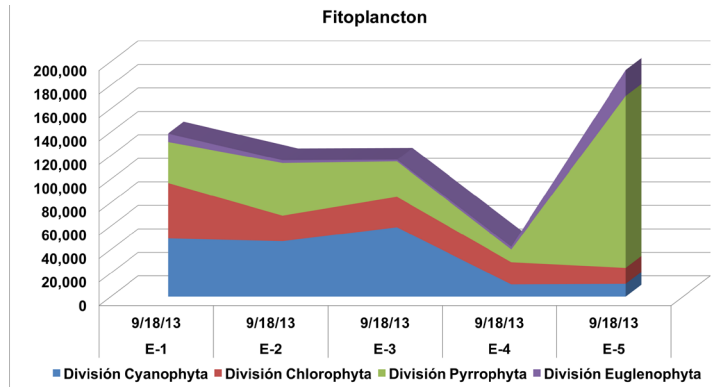


Figura 7.4.2 Resumen de la distribución del fitoplancton en el lago (Modificada de IMTA 2013).

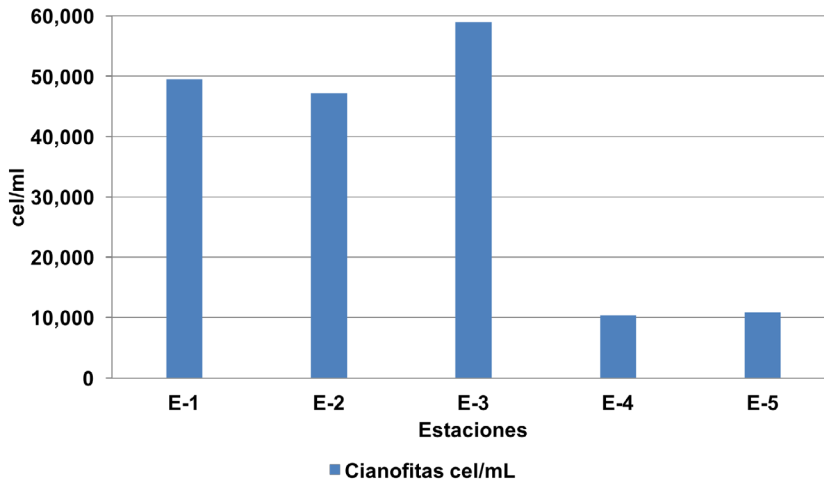


Figura 7.4.3 Probabilidad relativa de efectos agudos para la salud de acuerdo al número de cel/mL de cianofitas (Modificada de IMTA 2013).

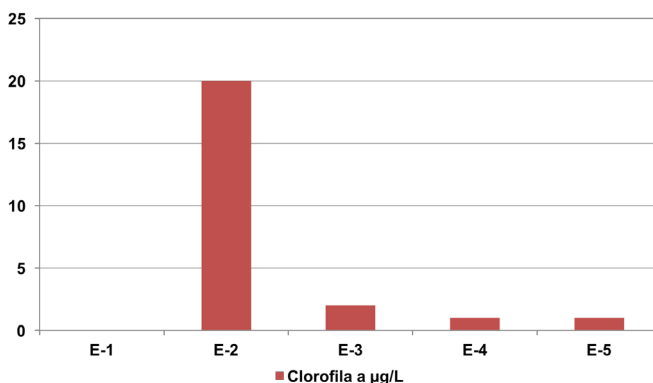


Figura 7.4. 4. Probabilidad relativa de efectos agudos para la salud de acuerdo los microgramos por litro de clorofila a (Modificada de IMTA 2013).

7.4.5.2 Muestreo en secas (estiaje)

La Figura 7.4.5, muestra el comportamiento de la abundancia del fitoplancton en el lago, como la suma de la densidad de las Divisiones en cada sitio. Las pirrofitas dominaron en todos los sitios durante el estiaje.

La Figura 7.4.6 muestra la comparación del comportamiento de las densidades de cada división del fitoplancton durante los periodos de lluvias y de secas. Se puede apreciar un incremento de las pirrófitas en la época de secas.

De acuerdo a los valores guía de la OMS, por el número de células por mililitro de cianofitas, en todos los sitios se tiene una probabilidad relativa de efectos agudos para la salud baja, ya que se obtuvieron valores menores a 20,000 células por mililitro (Figura 7.4.7).

De acuerdo a los valores guía de la OMS, considerando los microgramos por litro de clorofila a, en todos los sitios, se tiene una probabilidad relativa de efectos agudos para la salud baja, ya que se presentaron valores menores a 10 $\mu\text{g/L}$ (7.4.8).

De acuerdo a los valores guía de la OMS para la probabilidad relativa de efectos agudos para la salud, se tiene que por los microgramos por litro de MC-LR, en ninguno de los sitios se detectó la toxina por el método ELISA.

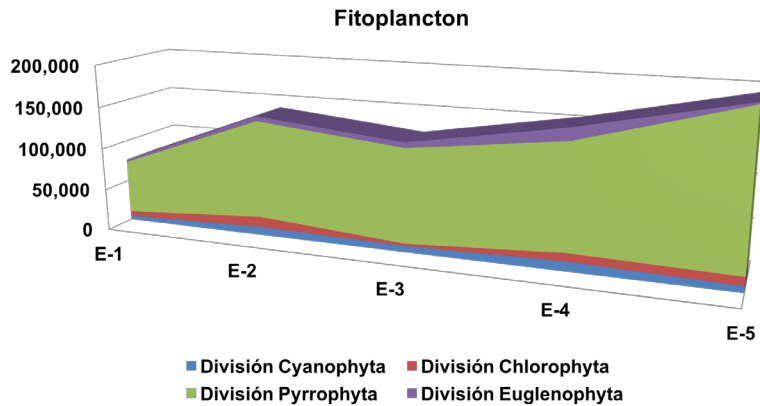


Figura 7.4.5 Resumen de la distribución del fitoplancton en el lago (Modificada de IMTA 2013).

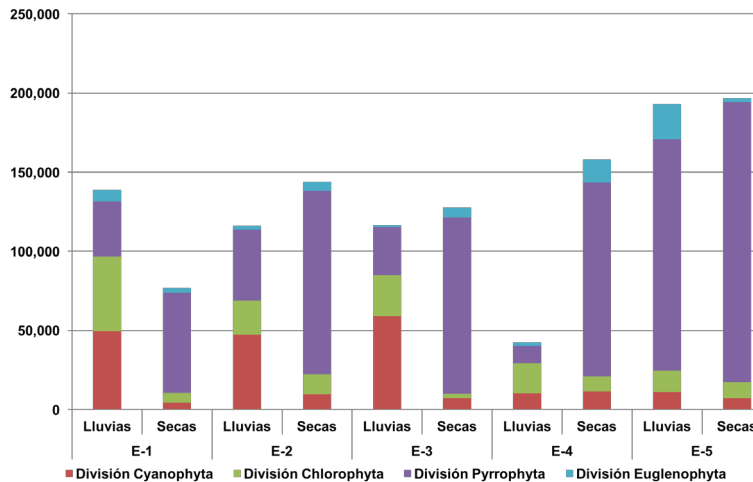


Figura 7.4.6 Comparación del número total de células por mililitro del fitoplancton en los periodos de lluvia y secas en el lago (Modificada de IMTA 2013).

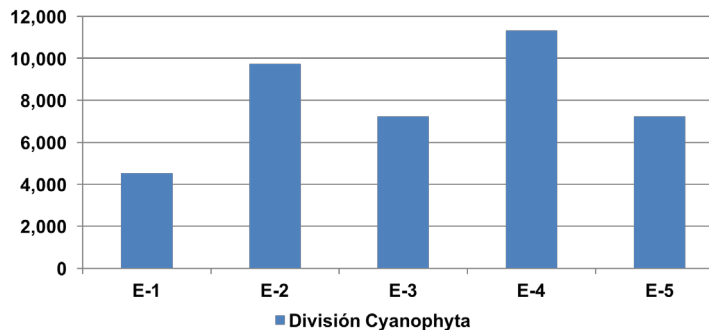


Figura 7.4.7 Comparación del número total de células por mililitro del fitoplancton en los periodos de lluvia y secas en el lago (Modificada de IMTA 2013).

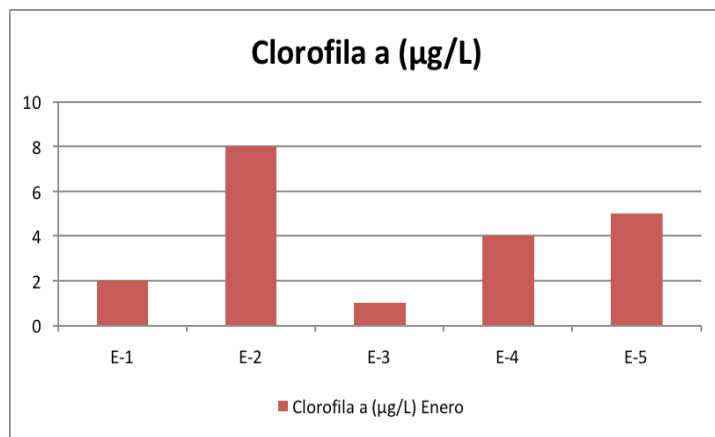


Figura 7.4.7 Comparación del número total de células por mililitro del fitoplancton en los periodos de lluvia y secas en el lago (Modificada de IMTA 2013).

7.5 DISCUSIÓN

Contaminantes químicos orgánicos e inorgánicos

En los sedimentos, se encontró Pb, Cu, Cr y Zn, en concentraciones entre 10 y 85 mg/kg en los dos muestreos. El Cd y el Hg no se detectaron en lluvias, tal vez porque la precipitación levanta los sedimentos acumulados en el año diluyendo la concentración. En secas, se detectaron con valores menores de 0.3 mg/kg.

Los niveles detectados en los sedimentos, se contrastaron con la Guía NOAA (2010) y algunos lineamientos emitidos por la provincia de Ontario en Canadá, toda vez que no existen criterios límite en las normas mexicanas para el manejo ambiental. La comparación indicó que estos metales se encuentran dentro del rango de concentraciones característicos del nivel basal o de origen geológico, que van de 4 a 17 mg/Kg para el Pb; de 7 a 13 mg/Kg para el Cr; de 10 a 25 mg/Kg para el Cu; de 7 a 70 mg/Kg para el Zn; de 0.1 a 0.3 mg/Kg para el Cd y de 0.004 a 0.51 mg/Kg para el Hg, en concentraciones que no generan efectos agudos o crónicos en los organismos expuestos.

Los ftalatos, o ésteres de ácido ftálico se derivan del petróleo. Se emplean para producir una variedad de plásticos como el polietileno, polivinilo, poliestireno y polipropileno, entre otros. Son más abundantes en los materiales plásticos más flexibles que se emplean en una amplia gama de productos como juguetes y contenedores de alimentos y bebidas, así como fijadores de aromas en productos cosméticos y de cuidado personal (Autian 1973; Cheung et al. 2007).

Los ftalatos son poco solubles en agua por lo que tienden a encontrarse en niveles muy reducidos (<0.001mg/L), considerablemente mayores en el sedimento (>0.1 mg/kg), ya que se adsorben rápidamente en las partículas del material que precipita en el fondo (WHO 2003).

Su presencia en el sedimento en la Laguna de Tuxpan no puede asociarse a un origen industrial, pero si a la liberación de estas sustancias por acción del

intemperismo sobre material plástico aportado por el lavado de ropa y autos, por las descargas municipales, o por la basura que se acumula en las orillas y fondo del lago.

En dosis de exposición >0.1 mg/L en especies acuáticas, o de ingesta de 0.8 mg/Kg/día en el ser humano (EPA 2007), estas sustancias emulan a los estrógenos alterando la función del sistema endócrino, principalmente en la tiroides y las gónadas, generando infertilidad. Estos efectos también se han observado en otros mamíferos, peces, aves, reptiles e invertebrados, por lo que son considerados sustancias de alto riesgo (Cheung et al. 2007). Las agencias de Protección Ambiental internacionales, tales como EPA y la Comunidad Europea los tienen clasificados como agentes de disfunción endócrina de alto riesgo ambiental y a la salud, así que le asignan prioridad para su control. Se requieren dosis muy altas para generar efectos tóxicos y no se clasifican como carcinógenos (EPA 1980; European Commission IARC).

La relevancia de la presencia de los ftalatos en el lago radica en su persistencia en el tiempo, pues se detectaron tanto en lluvias como en secas. Los ácidos ftálicos dodecil éster y butilester, usados en la fabricación de plásticos y polímeros, con el Dimetilftalato, Dibutilftalato, Etilhexilftalato y el Ácido ftálico y sus derivados, utilizado en cosméticos, jabones y saborizantes de alimentos comparten los riesgos mencionados a la salud del ser humano y del ambiente.

También se detectaron rastros de dos poliaromáticos, el 1,2,3,4-Tetrahidronaftaleno y el Fluoranteno, los cuales se asocian a la presencia de productos refinados derivados del petróleo como combustibles, gasolinas y aceites lubricantes. El fluoranteno está clasificado por IARC como carcinógeno nivel 3 (baja probabilidad); el primero no se encuentra en dicho listado. En ambos casos, los efectos tóxicos en especies acuáticas son relevantes para la fauna cuando se encuentran >100 $\mu\text{g/L}$, por lo que se consideran sustancias de bajo riesgo para el ambiente acuático (TOX NET <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/f?./temp/~dHrtiJ:1>).

La presencia en los sedimentos de los compuestos semivolátiles mencionados demanda el monitoreo del lago durante el estío, en condiciones de bajo volumen y mínima disolución, para identificar una mayor variedad de sustancias,

asociarlas con procesos productivos y actividades antropogénicas, y definir con mayor certeza las fuentes contaminantes, su persistencia y riesgo potencial en la generación de efectos adversos a la salud del sistema.

La atrazina y su metabolito la triazina, y los ftalatos alteran la producción de hormonas sexuales, principalmente estrógenos en el sistema endocrino, promoviendo la feminización, la infertilidad o reducción de la progenie, y la respuesta inmune de las especies expuestas. Por la forma de actuar, estos contaminantes son clasificados como disruptores endocrinos (Tyrone et al. 2010; Hayes 2010).

Estudios en ratas demuestran que la atrazina produce cáncer en próstata y mamas, retarda el desarrollo de estas e induce el aborto, efectos que pueden reproducirse en células y tejidos humanos (Swam 2006). En la Unión Europea la atrazina ha sido prohibida y sustituida incluso en Suiza, donde se produce. Sin embargo, en los EE.UU. y México se sigue utilizando por razones económicas. Su presencia en el ambiente implica un riesgo a la salud que debe evaluarse en la población asociada al sistema y, en su caso, sustituirse.

La atrazina genera daño a la reproducción en dosis muy reducidas ($> 0.1 \mu\text{g/L}$). Sus efectos evidencian mediante pruebas de toxicidad crónica sobre el desarrollo embrionario, tasa reproductiva o pruebas bioquímicas específicas en peces e invertebrados. En este estudio se realizó la prueba de toxicidad aguda (CL_{50}) en la mortalidad de *Daphnia magna*, la prueba sub-crónica sobre el metabolismo de *Vibrio fischeri*, y la inhibición del crecimiento poblacional con el alga *Pseudokirchneriella subcapitata*. Sin embargo, los indicadores de mortalidad y cambio metabólico (*D. magna* y *V. fischeri*), responden a concentraciones $>$ de 5.2 mg/L y 8 mg/L de atrazina, respectivamente (USEPA 2011; TOXNET). En la Laguna de Tuxpan la concentración es baja y no se observa como indicador de mortalidad y cambio metabólico, además no se considera como indicador de la reproducción.

La sensibilidad del crecimiento poblacional de *P. subcapitata* es suficiente para mostrar efectos inhibitorios a partir de concentraciones $> 15 \mu\text{g/L}$ sobre la fotosíntesis (Caux 1996). Esta prueba se incluye en una batería multitrofica debido a que los agentes nocivos pueden ser específicos para ciertos niveles tróficos, y es subcrónica dado que el indicador es el daño al crecimiento poblacional, aunque sirve para detectar toxicidad aguda.

Fitoplancton y Microcistina

Durante el periodo de lluvias, en el lago de Tuxpan el plancton estuvo dominado por los cladóceros (zooplancton) en los cinco sitios muestreados, con *Diaphanosoma birgei*, *Diaphanosoma* sp. y *Bosmina longirostris*. Les sigue las cianofitas *Gloeocapsa punctata*, *Microsystis* sp., *Chroococcus merismopedia* y *Gomphosphaeria* sp. (fitoplancton) en orden de importancia, dominando en los sitios E-1 (Seno Noreste), E-2 (Centro) y E-3 (Sur) mientras que en el sitio E-4 (Tomatal), la dominancia cambia a las clorofitas *Pediastrum* spp., debido a la calidad diferente del agua que ingresa por el río. En el sitio E-5 (Seno Este), dominan las crisofitas y corresponde a la zona más profunda y estancada del lago.

De acuerdo con Wetzel (1975), las características descritas coinciden con las de un cuerpo de agua eutrófico o en proceso de eutrofización, los cuales presentan una o dos especies dominantes de cianofitas acompañadas por otras de menor abundancia.

Durante el estiaje, el predominio cambió al fitoplancton de los géneros *Ceratium*, *Peridinium* y *Pyrrocystis*, (División Pyrrophyta) en la porción Este-Noreste, seguido por el zooplancton de los géneros *Nauplio*, *Cyclops* y *Limnocalanus* (Phylum Cyclopoidea) en el sitio E-4 (Tomatal).

Durante el verano tardío, especies del género *Ceratium* se asocian al fitoplancton de lagos templados oligotróficos a eutróficos (pero no hipertróficos), aunque son más comunes en los lagos mesotróficos (Hart y Wargg 2009). Florecen en aguas ricas en nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo total (o SRP), contrastando con la antigua percepción de que *Ceratium* era indicador de aguas claras. Por lo tanto, el Lago de Tuxpan está en proceso de eutrofización insipiente.

Aunque los florecimientos de *Ceratium* no son tóxicos, le imprimen al agua un olor y sabor desagradable, y abaten la concentración de oxígeno, lo que en muchas ocasiones resulta en un colapso masivo de células que pueden causar daños económicos e impacto en el ambiente (Pereira et al. 2013). *Ceratium* contiene especies tolerantes capaces de migrar nadando verticalmente para buscar las condiciones de luz y nutrientes adecuadas para su desarrollo (microhábitat). Su locomoción les permite sobrevivir a las fuertes presiones de depredación-pastoreo del zooplankton.

En México se han reportado muchos eventos de florecimientos de cianobacterias en varios estados de la República Mexicana como Jalisco, Michoacán, Veracruz, San Luis Potosí, Querétaro, Guanajuato, Puebla, Oaxaca, Hidalgo y el Estado de México; así como en diferentes cuerpos de agua en la Ciudad de México, como el lago de Chapultepec y los canales de Xochimilco y Cuemanco, donde la concentración total de MC-LR varió de los 4.9 a 78 µg/L (Arzate-Cárdenas et al. 2010; Vasconcelos et al. 2010; Oliva-Martínez et al. 2008), generando pérdidas económicas y riesgos de afectación a la salud.

En fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano en México, se han documentado florecimientos de cianobacterias en el lago de Chapala (Jalisco) y en Valle de Bravo (Estado de México). En la presa Valle de Bravo y otras del Sistema Cutzamala, que proveen cerca del 30% del agua potable a unos 6,000,000 de habitantes de la Ciudad de México y varios municipios mexiquenses, durante casi 6 meses al año se aprecia la presencia de cianobacterias, con florecimientos durante el verano, documentados desde 1998 a la fecha.

En 1999, se detectó la presencia de MC-LR en los meses de junio, septiembre y noviembre (Martínez-Romero et al. 2002, Ramírez-García et al. 2004). El florecimiento, principalmente de *Microcystis aeuroginosa* y *Lyngbya sp.*, provocó en el cuerpo de agua olor y sabor desagradables, que impactaron en las actividades turísticas del entorno.

Entre 2009 y 2011, en el lago de Pátzcuaro se han documentado florecimientos de cianobacterias en densidades altas a muy altas, de MC - LR, y de clorofila a, que definen un riesgo a la salud alto de acuerdo a la guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Sánchez-Chávez et al. 2011).

7.6 CONCLUSIONES

Contaminantes químicos orgánicos e inorgánicos

La Laguna de Tuxpan, presenta niveles no detectables de los distintos grupos de agentes contaminantes evaluados, incluidos los metales pesados y la mayoría de los contaminantes orgánicos (Volátiles, Plaguicidas Organoclorados, Carbamatos y PCB's). La excepción corresponde a los compuestos orgánicos semivolátiles (COSV) en cuyo análisis de barrido cromatográfico por GS-MS señaló la presencia de 6 tipos de ftalatos, sustancia que presentó la mayor incidencia en el cuerpo de agua, encontrándose en todos los sitios analizados y durante ambas épocas.

En la época de secas los resultados de COSV mostraron además la incidencia del herbicida atrazina, el cual también presentó una alta incidencia en forma similar a la amplia gama de compuestos que integra una lista de 158 sustancias entre las cuales predominan las fragancias empleadas en perfumes, productos químicos de productos cuidado personal y de uso en el hogar, los saborizantes de alimentos procesados, saponificantes, intermediarios de productos de productos farmacéuticos, fármacos de uso veterinario, aditivos de alimentos y pinturas acrílicas, solventes de uso en la producción de polímeros, plásticos, resinas y estireno, repelentes y esteroides asociados a contaminación fecal

El encuentro de las sustancias mencionadas dirige la atención a ubicar como principales fuentes de contaminación del lago a la actividad agrícola de la zona la cual aporta sustancias de alto riesgo como la atrazina y a las descargas municipales, las cuales, de acuerdo a Oppenheimer et al. (2008) y Miège et al. (2009), se caracterizan en su mayoría, por contener los productos tipo "principales" detectados en la Laguna de Tuxpan (fragancias y aditivos de PCP, cosméticos y perfumería, de alimentos procesados, productos farmacéuticos e indicadores químicos de contaminación fecal).

La atrazina (triazina) y los ftalatos son considerados contaminantes de riesgo para el ambiente acuático y a la salud humana debido al daño que generan en el sistema endócrino de las especies y en su reproducción. Su amplia distribución en el sistema sugiere la existencia de aportes crónicos que, en el caso de la atrazina, resultan del empleo del herbicida en la región, el cual puede transportarse al cuerpo de agua por escurrimientos pero también puede llegar a él y a los núcleos de población más cercanos por vía aérea. Por lo mismo, es recomendable evitar el uso de estos herbicidas.

En relación a los ftalatos y a la amplia lista de sustancias detectadas en el lago, es necesario tomar acciones que permitan el saneamiento de las descargas municipales mediante la aplicación de la tecnología adecuada para la remoción de las sustancias listadas y así mismo definir programas de recolección de basura plástica, la cual es una de las principales fuentes de aporte de estas sustancias al ambiente acuático. Estas acciones permitirían reducir los posibles efectos asociados que podrían poner en riesgo la persistencia de las poblaciones naturales de peces e invertebrados del cuerpo de agua.

Es importante diseñar un programa de monitoreo en el lago en el cual se empleen como indicadores para evaluar la efectividad de las acciones de mejora a la atrazina, los ftalatos y un grupo limitado de las fragancias encontradas, así como una batería de pruebas biológicas ampliada que incluya tanto las pruebas agudas, empleadas en este estudio, como las pruebas reproductivas y de desarrollo embrionario con las cuales será posible evaluar y evidenciar el alcance de la afectación actual por la presencia de estas sustancias y así mismo, dar el seguimiento adecuado a la evolución y mejora del cuerpo de agua.

Fitoplancton y microcistina

El lago de Tuxpan no presentó florecimientos importantes de cianofitas, como en otros cuerpos de agua en México. Sin embargo, durante las lluvias se incrementó la densidad de cianofitas, debido al aporte de nutrientes que llegan al lago a través de las escorrentías, provocando su crecimiento, pero no su dominancia, en forma coincidente con

el lago de Pátzcuaro, aunque en este, la presencia de cianofitas fue de un 99.94% en época de lluvias (Sánchez-Chávez et al. 2011) y para Tuxpan solo fue del 4%.

Sin embargo en el lago de Tuxpan, durante el periodo de lluvias, de acuerdo a los valores guía de la OMS, la probabilidad relativa de efectos agudos para la salud por el número de células por mililitro de cianofitas en los sitios E-1 a E-3 es moderada, y en E-4 y E-5 es baja. Por los microgramos por litro de clorofila a, en E-1 y de E-3 a E-5, la probabilidad relativa de efectos agudos para la salud fue baja y en E-2 es moderada. En cambio, durante el periodo de secas en los cinco sitios la probabilidad relativa de efectos agudos para la salud es baja. Por el método ELISA, en ninguno de los sitios se detectó riesgo por la toxina MC-LR (en microgramos por litro).

Se recomienda monitorear el lago y sus afluentes para aplicar oportunamente las estrategias para controlar la entrada excesiva de nutrientes, ya que podrían detonar el incremento masivo de cianofitas hasta provocar floraciones nocivas al cuerpo de agua y a la salud humana.

7.7 REFERENCIAS

- AGUAYO, S., M.J., MUÑOZ, A. DE LA TORRE, J. ROSET, E. DE LA PEÑA, M. CARBALLO. 2004. Identification of organic compounds and ecotoxicological assessment of sewage treatment plants (STP) effluents. *Sci Total Environ.* 26;328(1-3):69-81.
- ALONSO-ANDICOBERRY C., GARCÍA VILLADA L., V. LÓPEZ-RODAS y E. COSTAS, 2002. Catastrophic mortality of flamingos in a Spanish national park caused by cyanobacteria. *Vet. Rec.*, 151(23): 706-7.
- APHA (American Pollution Health Association). 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21th Ed. Washington DC, USA.
- ARZATE-CÁRDENAS, M.A., OLVERA-RAMÍREZ, R., y F. MARTÍNEZ-JERÓNIMO, 2010. Microcystis toxigenic strains in urban lakes: a case of study in Mexico City. *Ecotoxicology* DOI 10.1007/s10646-01-0499-7.
- AUTIAN, J. 1973 *Toxicity and Health Threats of phtalates Esters: Review of the literature*. Environmental Health Perspectives.
- BULICH, A.A. 1979. Use of luminiscent bacteria for determining toxicity in aquatic environments, p. 98-106. In: L.L. Markings and R.A. Kimerle (ed.), *Aquatic Toxicology*. ASTM 667. American Society for Testing Materials.
- BULICH, A.A., M. W. GREENE, Y D.L. ISENBERG. 1981. Reliability of the bacterial luminiscent assay for determination of the toxicity of pure compounds and complex effluents, p. 338-347. In: D.R. Branson and K.L. Dickson (ed.), *Aquatic Toxicology and Hazard Assessment: 4a Conference* ASTM STP 737. American Society of Testing and Materials.
- BRYANT, D.A., 1986. The cyanobacterial photosynthetic apparatus comparison to those of higher plants and photosynthetic bacteria. In: Plant, T. & Li, W. K. W. (Ed). *Photosynthetic picoplankton*. *Cann. Bull. Fish. Aquat. Sci.* 214: 71-120
- CANTER-LUND, H., y LUND, J. W.G. 1996. *Freshwater algae: Their microscopic world explored*. Biopress Ltd., Bristol. 360 p. ISBN 0 948737-25-5.
- CARSON, R. 2002. *Silent Spring, 40th Anniversary Edition*. First Mainer Books, USA, 404pp.
- CAUX, P.Y. 1996. *Environ Pollut* 92 (2): 219-25 as cited in the ECOTOX database. Available from, as of October 31, 2011: <http://cfpub.epa.gov/ecotox/>
- CHEUNG J.K., R.K. LAM, M.Y.Y. SHI, J.D. GU. 2007 Environmental fate of endocrine-disrupting dimethyl phthalate esters (DMPE) under sulfate-reducing condition: *Sci Total Environ.* 1; 381(1-3):126-33.
- CHORUS, I., Y BARTRAM, J., 1999. *Toxic Cyanobacteria in Water*. WHO. E&FN Spon. London and New York, 416 p.

- ELLEN Z. HARRISON, SUMMER RAYNE OAKES, MATTHEW HYSELL, ANTHONY HAY, 2006, Organic chemicals in sewage sludges. *Science of the Total Environment* 367: 481–497.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1980. Ambient water quality criteria for phthalate esters. Vol EPA 440/5-80-067: 112 p
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). 1991. *Methods for Measuring the Acute Toxicity of Effluent and Receiving Waters to Freshwater and Marine Organisms*. 4th Ed: Weber, C.I., Ed. EPA-600/4-90-027.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). 2007 *Phthalates*. TEACH Chemical Summary http://www.epa.gov/teach/chem_summ/phthalates_summary.pdf
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY 2011. USEPA/OPP, EFED; *Pesticide Ecotoxicity Database (2000) as cited in the ECOTOX database*. Available from, as of November 1, 2011: <http://cfpub.epa.gov/ecotox/>
- EUROPEAN COMMISSION. European Chemical Agency. Annex 6 List of 146 substances evaluated in the Expert meeting. http://ec.europa.eu/environment/archives/docum/pdf/bkh_annex_06.pdf.
- GRIGORIADOU A, SCHWARZBAUER J., AND GEORGAKOPOULOS A. 2008 Molecular indicators for pollution source identification in marine and terrestrial water of the industrial area of Kavala city, North Greece. *Environmental Pollution* 151: 231-242.
- HAYES B. T. 2010. The cause of global amphibian declines: a developmental endocrinologist's perspective. *Journal of Experimental Biology*, 213 (6): 921 DOI: 10.1242/jeb.040865
- HART, R.C. and WRAGG, P.D., 2009. Recent blooms of the dinoflagellate *Ceratium* in Albert Falls Dam (KZN): History, causes, spatial features and impacts on a reservoir ecosystem and its zooplankton. *Water SA*. 35(4): 455–468.
- IARC. *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans*. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php>
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. 2013. Estudio para la Identificación de las Causas Niveles y Grado de Contaminación Ambiental en la Laguna de Tuxpan, Guerrero y Propuestas para el Tratamiento de las Aguas Residuales Descargadas en Ella y sus Afluentes. IMTA-CAPASEG. *Informe Final. Tomo I. Convenio CCE.01.04.3.0.2013.-0231. México*.
- MARTÍNEZ-ROMERO, E., MARTÍNEZ-SALGADO M.D., M. MILLÁN-CABRERA y P. RAMÍREZ-GARCÍA, 2002. *Determinación de toxinas biológicas en una fuente de abastecimiento de agua dulce*. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México, 27 al 31 de octubre.
- MIÈGE C., CHOUBERT J.M., RIBEIRO L., EUSÈBE E., AND M. COQUERY. 2009. Fate of pharmaceuticals and personal care products in wastewater treatment plants - Conception of a database and first results. *Environmental Pollution*. 157 p. 1721 - p. 1726 "DOI: 10.1016/j.envpol.2008.11.045

- MONTERO, R. Y ARELLANO, O. 2009. Ambiente y Salud. *Gaceta Biomédicas*, Año 14, núm. 08: 6-9, Agosto.
- OLIVA-MARTÍNEZ, M.G., RODRÍGUEZ-ROCHA, A., A. LUGO-VÁZQUEZ y M.R. SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ., 2008. Composición y dinámica del fitoplancton en un lago urbano hipertrofico. *Hidrobiológica* 18(1).
- OMS (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD)., 1998. Algas y cianobacterias en aguas dulces. En: Guías para ambientes seguros en aguas recreativas. Volumen I. *Aguas costeras y aguas dulces*. Capítulo 7. Ginebra. CH.
- OPPENHEIMER J., R. STEPHENSON, A. BURBANO, Y LI LIU. 2008. Characterizing the Passage of Personal Care Products Through Wastewater Treatment Processes. *Water Environment Research*. 79 (13): 2564-2577
- PEREIRA CAVALCANTE, K., CONTE ZANTELLI J., C.C. MÜLLER, K. DORNELLES SCHERER, J. KARL FRIZZO, T.A. VEIGA LUDWING, L. de SOUZA CARDOSO, 2013. First record of expansive *Ceratium* Schrank, 1793 species (Dinophyceae) in Southern Brazil, with notes on their dispersive patterns in Brazilian environments. *Check List* 9(4): 862-866.
- QUESADA-CORRAL, A., D. CARRASCO, y S. CIRÉS, 2006. *Cianobacterias en aguas de consumo humano y de recreo. Un problema de todos*. Ponencia en Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).
- SECRETARIA DE COMERCIO Y FOMENTO INDUSTRIAL. 1995. *Norma Mexicana NMX-AA-112- SCOFI. Análisis de agua y sedimentos*. Evaluación de toxicidad aguda con *Photobacterium phosphoreum*. Método de pruebas DGN. pp. 36
- SECRETARIA DE COMERCIO Y FOMENTO INDUSTRIAL (SECOFI). 2010. *Norma Mexicana NMX-AA-087- SECOFI. Análisis de agua*. Evaluación de toxicidad aguda con *Daphnia magna*. Straus, (Crustácea -Cladóccera). Método de prueba DGN. pp. 39.
- PÉREZ, D.S., SORACI, A.L., y M.O. TAPIA. 2008. Cianobacterias y cianotoxinas: Rol de las microcistinas en la salud humana y animal y su detección en muestras de agua. *Analecta Veterinaria* 281: 48-56.
- ROSET, J., AGUAYO, S., y M.J. MUÑOZ. 2001. Detección de cianobacterias y sus toxinas. Una revisión. *Rev. Toxicol.* 18: 65-71.
- SÁNCHEZ-CHÁVEZ, J.J., L.A. BRAVO-INCLÁN, A.C. TOMASINI-ORTIZ, R. GONZÁLEZ-VILLELA, M.A. CÓRDOVA-RODRÍGUEZ y R.S. VILLALOBOS-HERNÁNDEZ, 2011. *Monitoreo de la calidad del agua del lago y de las descargas. Subcoordinación Hidrobiología y Evaluación Ambiental*. Coordinación Tratamiento y Calidad del Agua. Informe final Proyecto TC-0847. Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro. Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- TOMASINI-ORTIZ, A.C., G. MOELLER-CHÁVEZ, J. J. SÁNCHEZ-CHÁVEZ y L.A. BRAVO-INCLÁN, 2012a. Cianobacterias y Cianotoxinas en el Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica*.

- 5(2):93-101. <http://www.journal.unam/index.php/aidis/index>.
- TOMASINI-ORTIZ, A.C., G.E. MOELLER-CHÁVEZ, J.J. SÁNCHEZ-CHÁVEZ y L.A. BRAVO-INCLÁN, 2012b.** Cianobacterias y cianotoxinas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. ATL. *El portal del agua desde México*. Julio, Núm. 37. <http://atl.org.mx>.
- TYRONE B. HAYES, VICKY KHOURY, ANNE NARAYAN, MARIAM NAZIR, ANDREW PARK, TRAVIS BROWN, LILLIAN ADAME, ELTON CHAN, DANIEL BUCHHOLZ, THERESA STUEVE, AND SHERRIE GALLIPEAU. 2010.** Atrazine induces complete feminization and chemical castration in male African clawed frogs (*Xenopus laevis*). *PNAS*, March 1, 2010 DOI: 10.1073/pnas.0909519107
- VALLENTYNE, J. R. (1972)**, “Freshwater supplies and pollution: Effects of the demographic explosion on water and man”, en N. Polunin (ed.), *The Environmental Future*, Londres, Macmillan Press Ltd., pp. 181-211. Citado en Wetzel, R. G. (2001), *Limnology. Lake and River Ecosystems*, 3ra ed., San Diego, Academic Press.
- VASCONCELOS, V., MARTINS, A., M. VALE, A. ANTUNES, J. AZEVEDO, M. WELKER, O. LÓPEZ y G. MONTEJANO, 2010.** First report on the occurrence of microcystins in planktonic cyanobacteria from Central Mexico. *Toxicon* 56(3): 425-431.
- WETZEL, R. G., 1975.** *Limnology*. Saunders Publ. Co. Philadelphia. Ed. 2001. 716 p.





CAPITULO 8

Propuesta tecnológica para el manejo y tratamiento de las aguas residuales que ingresan al lago "Laguna de Tuxpan, Gro."

EDITORES:

Gabriela Mantilla Morales
Ana Cecilia Tomasini Ortiz

CONTENIDO

Capítulo 8

8.1 INTRODUCCIÓN	302
8.2 ÁREA DE ESTUDIO	303
8.3 METODOLOGÍA	306
8.4 RESULTADOS	308
8.4.1. Caracterización de las descargas y del río	308
8.4.2. Generación de agua residual	312
8.4.3. Propuesta de manejo de las aguas residuales	314
8.5 DISCUSIÓN	315
8.6 CONCLUSIONES	320
8.7 REFERENCIAS	321

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 8.2.1. Localidad de Tuxpan, Gro. (Modificada de IMTA 2013).	303
Figura 8.2.2. Colonia El Tomatal, Gro. (Modificada de IMTA 2013).	303
Figura 8.2.3. Localización, relieve e hidrografía del municipio de Iguala de la Independencia, Gro. (Modificada de IMTA 2013).	304
Figura 8.2.4. Laguna de Tuxpan y sus afluentes (Modificada de IMTA 2013).	305
Figura 8.2.5. Localización de la PTAR-Iguala (Modificada de IMTA 2013).	306
Figura 8.3.1. Proyección de crecimiento de la población de Tuxpan (Modificada de IMTA 2013).	308
Figura 8.4.1. Localización de los lavaderos públicos en Tuxpan (A) y de las descargas al río Tomatal (B) (Modificada de IMTA 2013).	309
Figura 8.4.2. Ubicación de los puntos de muestreo (Modificada de IMTA 2013).	310
Figura 8.5.1. Líneas de conducción de bombeo de aguas residuales. Plano No.2/4 (Modificada de IMTA 2013).	318

Figura 8.5.2. Red de alcantarillado sanitario. Cárcamo 1 y 2. Plano 1/1 (CAPASEG) (Modificada de IMTA 2013).	318
Figura 8.5.3. Línea de conducción de aguas residuales propuesta hacia Iguala (Modificada de IMTA 2013).	319
Figura 8.5.4. Colector Tuxpan – Iguala. Longitud aproximada: 4900 m (Modificada de IMTA 2013).	320
Figura 8.5.5. Propuesta conceptual de la red de alcantarillado para la colonia El Tomatal (Modificada de IMTA 2013).	320
Figura 8.5.5. Colector El Tomatal – Iguala. Longitud aproximada: 2930 m (Modificada de IMTA 2013).	321

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 8.3.1. Censo de viviendas y servicios de Tuxpan y El Tomatal	307
Cuadro 8.4.1. Ubicación de los puntos de muestreo	310
Cuadro 8.4.2. Parámetros de campo	311
Cuadro 8.4.3. Parámetros de fisicoquímicos.	311
Cuadro 8.4.4. Parámetros microbiológicos	312
Cuadro 8.4.5. Metales pesados y cianuros	312
Cuadro 8.4.6. Caracterización de las descargas de agua residual de El Tomatal.	313
Cuadro 8.4.7. Cálculo de la generación de aguas residuales de la población de Tuxpan.	314
Cuadro 8.4.8. Caracterización de diseño del agua residual municipal de Tuxpan.	314

8.1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población humana en el mundo tiene consecuencias para el entorno natural por efecto de la urbanización y el aumento de sus actividades productivas. Los humanos producen basura orgánica e inorgánica, así como heces y orina, de las que se deshacen depositándolas en el exterior de sus núcleos habitacionales o alejándolas con agua a través de canales y tuberías, o depositándolas en letrinas que con el tiempo producen lixiviados que se esparcen por el subsuelo alcanzando a los mantos freáticos.

Si la población es pequeña, los espacios naturales son muy amplios y las fuentes de agua abundantes, las consecuencias del crecimiento no son notables puesto que la mayoría de los ecosistemas tienen la capacidad de amortiguar las perturbaciones. Pero si el espacio y el suministro de agua son restringidos, la acumulación de residuos además de volverse evidente tiene consecuencias negativas tanto para el ambiente como para la población (Valentine 1972).

Tal es el caso del lago denominado “Laguna de Tuxpan”, y su tributario principal denominado río “El Tomatal”, cerca de la ciudad de Iguala de la Independencia, en el estado de Guerrero. Este cuerpo de agua se ubica en una subcuenca cuyo suelo está siendo deforestado rápidamente para usarlo con fines agrícolas, pecuarios, urbanos y turísticos, teniendo como consecuencia el azolvamiento de la cubeta y la contaminación del agua.

Como parte de las acciones para el manejo de las causas, niveles y grado de contaminación ambiental del lago y su tributario, se propone la implantación de las tecnologías que se describen en el presente capítulo, para el tratamiento de las aguas residuales crudas y evitar su descarga en el lago y sus afluentes.

La propuesta consiste en identificar la solución más adecuada para las poblaciones de Tuxpan y El Tomatal, considerando la distribución de la población en el área, la topografía de la zona y la generación de aguas residuales. Es importante tomar en cuenta que el grado de marginación de las localidades es alto, por

lo que la propuesta debe ser de bajo costo de operación y mantenimiento. Por lo tanto, se elabora un plan de manejo de las descargas de agua residual para el saneamiento de la Laguna de Tuxpan.

8.2 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está conformada por la población de Tuxpan (Figura 8.2.1) y la Colonia El Tomatal (Figura 8.2.2), localizadas en el municipio de Iguala de la Independencia, Gro., el cual forma parte de la microcuenca de Tuxpan (Figura 8.2.3).

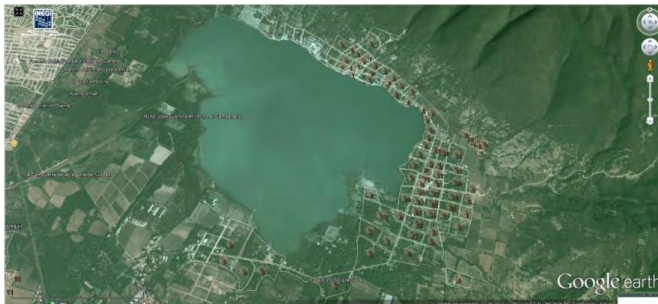


Figura 8.2.1. Localidad de Tuxpan, Gro. (Modificada de IMTA 2013).

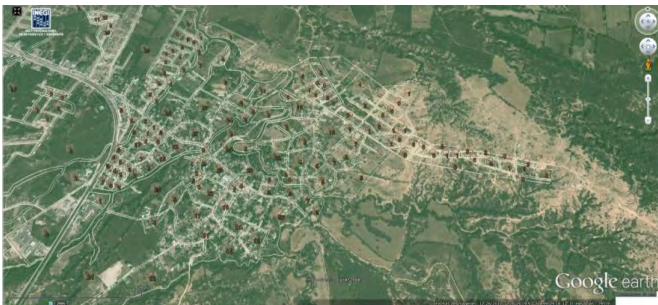


Figura 8.2.2. Colonia El Tomatal, Gro (Modificada de IMTA 2013).

Ambas poblaciones son aledañas al lago, la cual es alimentada principalmente por ríos y arroyos intermitentes. Destaca también el río El Tomatal (Figura 8.2.4) el cual bordea a la ciudad de Iguala; y el lago, el cual es un afluente del río La Gotera y atraviesa la ciudad de Iguala y se convierte, a su vez, en un afluente de los ríos San Juan e Iguala, cuyos cauces van en dirección hacia el municipio de Cocula, (INEGI, 2009).

La colonia El Tomatal se encuentra aproximadamente a cuatro kilómetros de la ciudad de Iguala, mientras que la localidad de Tuxpan se encuentra a 5.5 kilómetros.

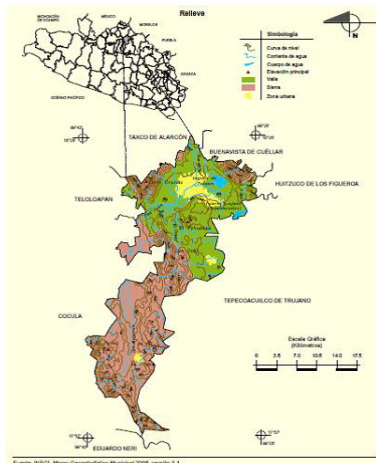


Figura 8.2.3. Localización, relieve e hidrografía del municipio de Iguala de la Independencia, Gro. (Modificada de IMTA 2013).



Figura 8.2.4. Laguna de Tuxpan y sus afluentes (Modificada de IMTA 2013).

En la subcuenca se ubica la planta de tratamiento de aguas residuales de Iguala (Figura 8.2.5), que tiene una capacidad instalada de 260 L/s y que entró en servicio en 2013 (CAPASEG, 2013). La planta de tratamiento tiene actualmente un gasto de operación de 130 L/s, de acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento 2014 (CONAGUA, 2014). La planta de tratamiento se localiza al suroeste de la Ciudad de Iguala y el efluente tratado es vertido hacia el río San Juan.



Figura 8.2.5. Localización de la PTAR-Iguala (Modificada de IMTA 2013).

8.3 METODOLOGÍA

Para desarrollar la propuesta tecnológica para el tratamiento de las aguas residuales se efectuaron visitas de campo y muestreos compuestos de las descargas. En las visitas de campo se establecieron los puntos de monitoreo de las descargas de aguas residuales a la Laguna de Tuxpan y al río El Tomatal.

Los muestreos compuestos se realizaron de acuerdo con los parámetros y metodología establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, donde se indican los límites máximos permisibles de los parámetros de calidad del agua para diferentes tipos de cuerpo receptor. Asimismo, conforme a los requerimientos de la Ley Federal de Derechos se determinó la Demanda Química de Oxígeno (DQO). El análisis de las muestras fue realizado por el Laboratorio de Calidad del Agua del IMTA, bajo los estándares de calidad ISO-9000-2004 y las NMX's.

Para determinar el caudal a tratar generado, es necesario determinar el número de habitantes de las dos localidades. Se consultó el Censo de población y vivienda de 2010. En Tuxpan se contabilizaron 77 manzanas, donde se determinó que solo el 72% estaban habitadas. Solo 40 de estas viviendas cuentan con agua entubada, el resto se abastece mediante pozos. La colonia El Tomatal cuenta con 145 manzanas y 1266 viviendas, de las cuales solamente están habitadas el 79% y el 47% cuentan con agua entubada. Todas las viviendas cuentan con fosas sépticas (Cuadro 8.3.1).

Cuadro 8.3.1. Censo de viviendas y servicios de Tuxpan y El Tomatal

Localidad	Total de viviendas particulares	Total de viviendas habitadas	Total de viviendas no habitadas	Vivienda con agua entubada	Vivienda con drenaje	Vivienda con sanitario
Tuxpan	820	593	225	40	350	381
El Tomatal	1266	1003	282	592	678	712

Fuente: IMTA 2013

La principal actividad económica de la comunidad de Tuxpan es el turismo, sobre todo en el giro de restaurantes, los cuales se ubican alrededor del lago. Las aguas residuales que generan estos establecimientos son enviadas a una fosa séptica o se descargan directamente al lago. El dimensionamiento del sistema de tratamiento se efectuó con base en el crecimiento estimado de la población.

Para determinar el crecimiento de la población con un horizonte al año 2040 se utilizaron cuatro métodos: aritmético, geométrico, geométrico modificado y tasa declinante (Figura 8.3.1), con fines de cálculo se seleccionó el método aritmético.

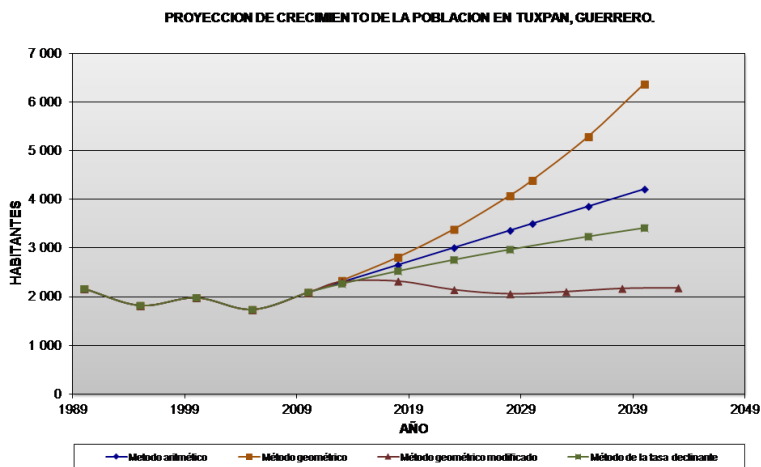


Figura 8.3.1. Proyección de crecimiento de la población de Tuxpan (Modificada de IMTA 2013).

La propuesta tecnológica se definió a partir de los resultados de los caudales aforados y la calidad de agua residual en los puntos de descarga, mismos que cumplieron con los parámetros que marca la NOM-001-SEMARNAT-1996 para cuerpo receptor tipo C, en el caso de descargar en el lago, de lo contrario se tendría que evitar cualquier descarga en ella.

8.4 RESULTADOS

En Tuxpan no hay sistema de drenaje y se contabilizaron 78 lavaderos públicos en el interior del lago (Figura 8.4.1). En El Tomatal los drenajes domiciliarios descargan directamente a las calles y avenidas de la comunidad ya que no hay red de alcantarillado. Algunas viviendas cuentan con fosa séptica que generalmente recibe las descargas sanitarias, mientras que las aguas grises se vierten hacia las calles y posteriormente escurren hacia las barrancas que atraviesan la comunidad.

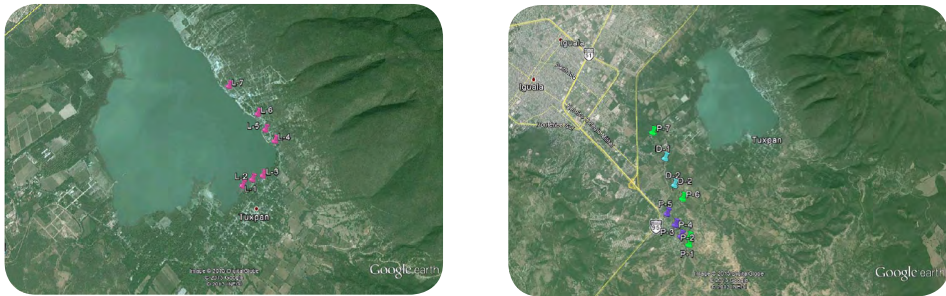


Figura 8.4.1. Localización de los lavaderos públicos en Tuxpan (A) y de las descargas al río Tomatal (B) (Modificada de IMTA 2013).

8.4.1 Caracterización de las descargas y del río

Se identificaron tres puntos de descarga al río Tomatal y se detectaron los puntos antes y después de las otras descargas de aguas residuales (Figura 8.4.1 y Figura 8.4.2). En el Cuadro 8.4.1 se presentan la ubicación de los puntos descritos. Los resultados de la caracterización de las descargas se presentan en el Cuadro 8.4.2 al Cuadro 8.4.6.

Cuadro 8.4.1. Ubicación de los puntos de muestreo.

Identificación	Latitud N	Longitud	Altitud (m)
Río Tomatal 1	18°19'12.6"	99°29'20.5"	798
Río Tomatal 2	18°19'17.9"	99°29'24.7"	785
Río Tomatal 3	18°19'46.1"	99°29'39.5"	780
Río Tomatal 4	18°20'28.0"	99°30'24.8"	767
Río Tomatal 5	18°20'49.23"	99°30'20.22"	760
Descarga 1	18°19'17"	99°29'30"	797
Descarga 2	18°19'24"	99°29'38"	797
Descarga 3	18°19'30"	99°29'48.0"	804

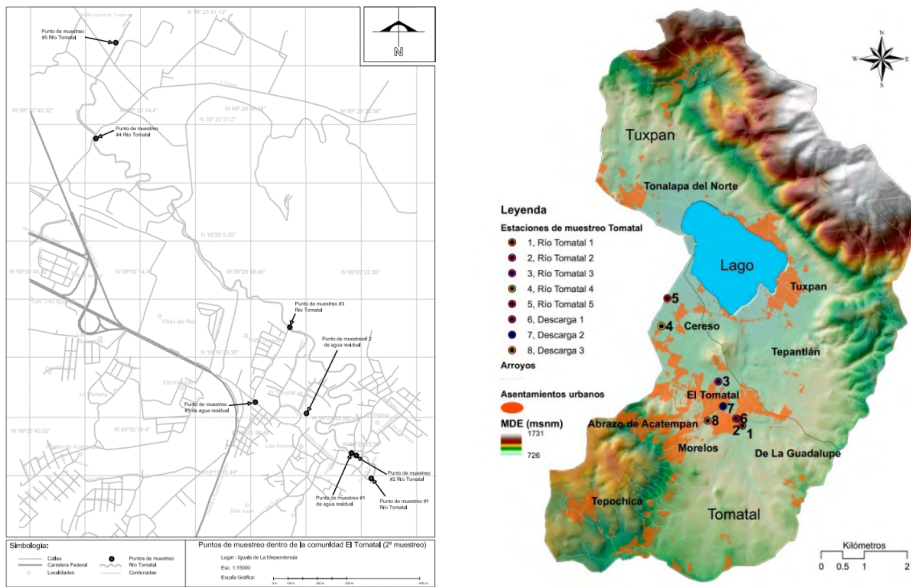


Figura 8.4.2. Ubicación de los puntos de muestreo (Modificada de IMTA 2013).

Cuadro 8.4.2. *Parámetros de campo.*

Identificación	Q (L/s)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	MF (P/A)
Río Tomatal 1	265.0	26.63	7.98	203.50	A
Río Tomatal 2	272.3	26.78	7.95	202.50	A
Descarga 1	0.08	28.55	8.15	806.00	A
Descarga 2	5.11	24.03	7.46	930.25	A
Descarga 3	0.03	26.93	7.61	771.00	A
Río Tomatal 3	298.5	27.48	8.00	222.25	A
Río Tomatal 4	316.5	26.53	7.94	245.25	A

MF: Materia flotante; P/A: Presente/Ausente.

Fuente: IMTA 2013

Cuadro 8.4.3. *Parámetros de físicoquímicos.*

Identificación	DQO mg/L	DBO mg/L	GyA mg/L	S.Sed. mg/L	SST mg/L	P-Total mg/L	N (NO ₃ ⁺ NO ₂ ⁻) mg/L	NTK mg/L	NT mg/L
Río Tomatal 1	31.3	2.5	<2.73	<0.5	198	<0.36	0.577	2.02	2.6
Río Tomatal 2	34.4	2.3	11.6	<0.5	132	<0.36	0.53	3.27	3.8
Descarga 1	1228	572.0	32.6	4.0	360	5.18	0.67	18.1	18.8
Descarga 2	52.4	13.2	6.7	<0.5	<34.28	1.2	0.225	5.23	5.46
Descarga 3	397.0	179.0	29.6	0.8	145	5.47	0.179	17.3	17.5
Río Tomatal 3	62.8	3.9	14.97	<0.5	178	<0.36	0.956	1.86	2.82
Río Tomatal 4	32.1	3.4	5.7	<0.5	98	<0.36	0.987	2.14	3.13

Fuente: IMTA 2013

Cuadro 8.4.4. Parámetros microbiológicos.

Identificación	CF (NMP/100mL)	CT (NMP/100mL)	HH (N° Huevos/5L)
Río Tomatal 1	1.99E03	2.97E+04	0
Río Tomatal 2	7.73E02	2.67E+04	0
Descarga 1	1.14E06	1.98E+07	0
Descarga 2	9.78E04	4.45E+06	0
Descarga 3	2.26E06	5.33E+07	2
Río Tomatal 3	1.63E04	8.80E+04	0
Río Tomatal 4	8.60E04	3.49E+05	0

Fuente: IMTA 2013

Cuadro 8.4.5. Metales pesados y cianuros.

Identificación	As	DBO mg/L	GyA mg/L	S.Sed. mg/L	SST mg/L	P-Total mg/L	N (NO ₃ ⁺ NO ₂ ⁻) mg/L	NTK mg/L	NT mg/L
Río Tomatal 1	0.0415	<0.02	<0.02	<0.05	<0.1	<0.001	<0.05	<0.1	0.874
Río Tomatal 2	0.0339	<0.02	<0.02	<0.05	<0.1	<0.001	<0.05	<0.1	0.872
Descarga 1	0.0720	<0.02	<0.02	<0.05	<0.1	<0.001	<0.05	<0.1	0.936
Descarga 2	0.1086	<0.02	<0.02	<0.05	<0.1	<0.001	<0.05	<0.1	0.880
Descarga 3	0.1162	<0.02	<0.02	<0.05	<0.1	<0.001	<0.05	<0.1	0.969
Río Tomatal 3	0.0360	<0.02	<0.02	<0.05	<0.1	<0.001	<0.05	<0.1	0.865
Río Tomatal 4	0.0417	<0.02	<0.02	<0.05	<0.1	<0.001	<0.05	<0.1	0.861

Fuente: IMTA 2013

Los caudales menores a 0.5 L/s se presentaron hasta la descarga 2. La evaluación se realizó durante lluvias, lo que se reflejó en los valores bajos de carga orgánica (para ser agua residual municipal), como en la descarga 2, con un gasto mayor de 5 L/s. En la caracterización de los metales pesados y cianuros, los únicos elementos que se detectaron fueron el arsénico y el zinc, en cantidades menores a las establecidas en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

El muestreo simple en época de secas se realizó para verificar los parámetros básicos. Las descargas 1 y 3 presentan caudales inferiores a 1 L/s, mientras que la descarga 2 presenta un caudal máximo de 1.47 L/s, menos del 30% del gasto aforado durante la primera caracterización (Cuadro 8.4.6). Estas descargas tienen menor influencia del escurrimiento pluvial, y las descargas vertidas al río El Tomatal pueden ser clasificadas como típicas de baja carga.

Cuadro 8.4.6. Caracterización de las descargas de agua residual de El Tomatal.

Identificación	Q L/s	DQO mg/L	DBO mg/L	NO ₃ mg/L	NH ₃ mg/L	NT mg/L	PT mg/L
Descarga 1	0.281	150	127	4.6	7.4	15.2	7.7
	0.261	82	40	11.2	3.85	14.8	5.6
Descarga 2	1.471	94	41	2.9	8.45	8.4	7.4
	1.408	257	184	3	8.43	12.2	8.5
Descarga 3	0.090	893	471	30	4.75	7.7	24.9
	0.083	616	268	9	25	34	44.1

Fuente: IMTA 2013

8.4.2 Generación de agua residual

El 30% de la población de Tuxpan cuenta con servicio de agua potable durante 12 horas al día. Se considera que la dotación es de aproximadamente 71.4 L/hab-d. En la población no hay control de la distribución de agua potable, por lo que se utilizó una dotación de 100 L/hab-d. En el cuadro 8.4.7 se presentan los caudales

de diseño. En el Cuadro 8.4.8 se presenta la caracterización de diseño para la población de Tuxpan.

Cuadro 8.4.7. Cálculo de la generación de aguas residuales de la población de Tuxpan.

Año	Población total	Qmed APot (L/s)	Qmed AR (L/s)	Qmax diario AR (L/s)	Qmax horario AR (L/s)	Qmax extraord. AR (L/s)	Qmin AR (L/s)
2013	2,298	1.7	2.2	3.0	4.5	5.8	0.6
2018	2,652	2.0	2.5	3.5	5.2	6.5	0.7
2023	3,006	2.3	2.8	3.9	5.9	7.3	0.8
2028	3,360	2.6	3.2	4.4	6.6	8.1	0.9

Fuente: IMTA 2013

Cuadro 8.4.8. Caracterización de diseño del agua residual municipal de Tuxpan.

Parámetro	Unidad	mg/l
DBO	mg/L	254.73
DQO	mg/L	559.13
S. Sed.	mg/L	1.77
GyA	mg/L	22.97
N (NO ₃ +NO ₂)	mg/L	0.358
NTK	mg/L	13.54
NT	mg/L	13.92
PT	mg/L	3.95
SAAM	mg/L	0.00
CT	NMP/100mL	2.59E+07
SST	mg/L	179.76
SSV	mg/L	134.82

Fuente: IMTA 2013

8.4.3 Propuesta de manejo de las aguas residuales

Se analizó la pertinencia de:

- 1.- Tratar las aguas residuales mediante un sistema instalado en Tuxpan o bien.
- 2.- Conducir las aguas residuales hacia la planta de tratamiento de la ciudad de Iguala debido a que el 30% de la población reside al norte del lago y el 70% en la zona oriente.

Para el primer caso, se revisaron los siguientes sistemas:

- Sistema de lodos activados convencional
- Biofiltración sobre lecho orgánico de alta eficiencia (Biotrop®)
- Sistema de tipo planta paquete con biomasa fija Biosistec® (Bios-tar-IMTA)

En lo que corresponde a las tres descargas generadas por la colonia El Tomatal, se consideró instalar un sistema de tratamiento en cada una de ellas o bien, conducir las aguas residuales hacia la planta de tratamiento de la ciudad de Iguala. En el primer caso, se revisaron los siguientes sistemas:

- Biofiltración sobre lecho orgánico de alta eficiencia (Biotrop®)
- Sistema de tipo planta paquete con biomasa fija Biosistec® (Biostar-IMTA)

Es importante resaltar que para cualquier solución es indispensable considerar la recolección de las aguas generadas por la población para poder conducir las al sistema de tratamiento elegido. Uno de los principales problemas que presentan los sistemas descentralizados es la falta de capacidad técnica y económica de los organismos operadores de las localidades pequeñas para ocuparse de la operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. En ocasiones, el pago de la energía eléctrica necesaria para la operación de los sistemas los vuelve inoperables. En este sentido, se propone conducir las aguas residuales hacia la planta de tratamiento de Iguala, considerando que el caudal generado por las dos localidades es de aproximadamente 9 L/s, lo cual no representa una sobrecarga al sistema, sobre todo si se considera que opera a la mitad de su capacidad de diseño.

8.5 DISCUSIÓN

Se considera que la solución más adecuada para el manejo de las aguas residuales de las localidades es el envío de las mismas a la planta de tratamiento Iguala. La colonia El Tomatal se encuentra aproximadamente a cuatro kilómetros de la ciudad de Iguala, mientras que la localidad de Tuxpan se encuentra a 5.5 kilómetros.

Durante los recorridos en campo y la revisión de la información, se analizó la posibilidad de implementar sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales en ambas localidades, pero también se consideró la pertinencia de conectar ambos núcleos de población a la red de alcantarillado de la ciudad de Iguala y aprovechar la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Iguala de la Independencia, así como el colector marginal en el río San Juan. La PTAR está diseñada en tres módulos de 130 L/s cada uno, y en su primera etapa consta de dos módulos, lo que representa una capacidad instalada de tratamiento actual de 260 L/s.

La población de El Tomatal genera aproximadamente 4 L/s de aguas residuales, mientras que Tuxpan aporta alrededor de 5 L/s, por lo que conectar los caudales generados por ambas poblaciones no representa una sobrecarga para la PTAR Iguala.

No se cuenta con el plano de drenajes de la ciudad para revisar su configuración y proponer los sitios de conexión de las posibles redes provenientes de Tuxpan y El Tomatal a la red de la ciudad. Sin embargo, se realiza una propuesta conceptual de conexión de ambas comunidades a la ciudad de Iguala.

En el caso de Tuxpan, la población se ha establecido sobre la margen derecha de la Laguna de Tuxpan, y se comienzan a desarrollar nuevos asentamientos en la parte norte. Se cuenta con el proyecto de la red de alcantarillado de la localidad (Figuras 8.5.1 y 8.5.2) pero no se conecta a ningún sistema de tratamiento.

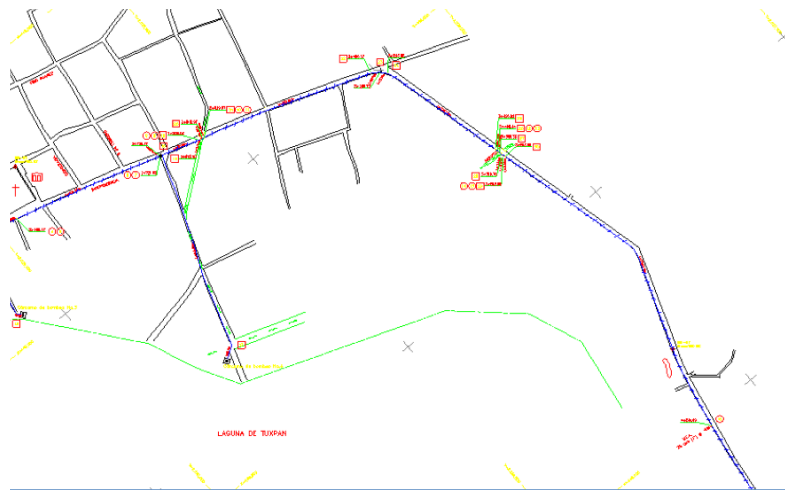


Figura 8.5.1. Líneas de conducción de bombeo de aguas residuales. Plano No. 2/4 (Modificada de IMTA 2013).

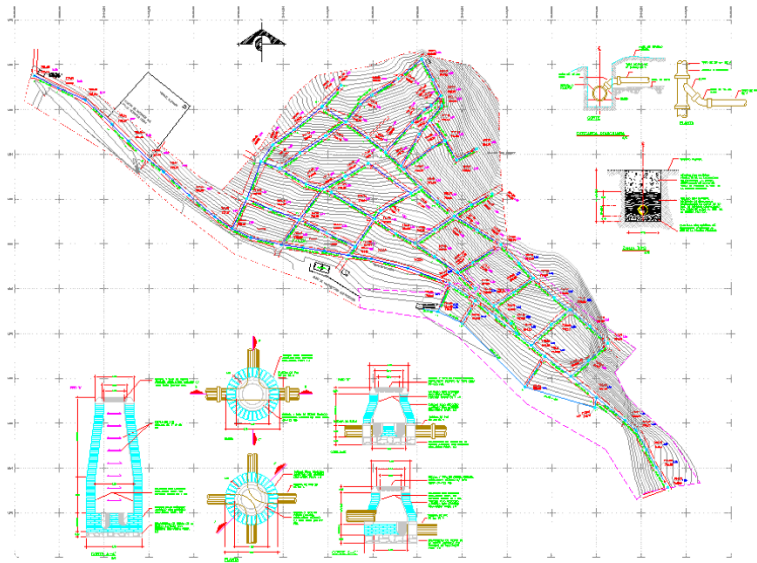


Figura 8.5.2. Red de alcantarillado sanitario. Cárcamo 1 y 2. Plano 1/1 (CAPASEG) (Modificada de IMTA 2013).

Si se considera la posibilidad de enviar las aguas residuales a la PTAR Iguala, se puede tomar la decisión de inyectar las aguas al colector de la ciudad, o bien instalar un nuevo colector paralelo al canal de riego. En la Figura 8.5.3 se presenta la propuesta de conducción desde la salida de Tuxpan hasta Iguala. A partir de datos obtenidos mediante Google Earth (distancias y elevaciones sobre el nivel del mar), se considera que se necesita construir un colector de aproximadamente 4900 m (Figura 8.5.4). En este punto, es importante decidir si el agua residual se introduce a la red de alcantarillado existente o bien se construye un nuevo colector paralelo al canal de riego.

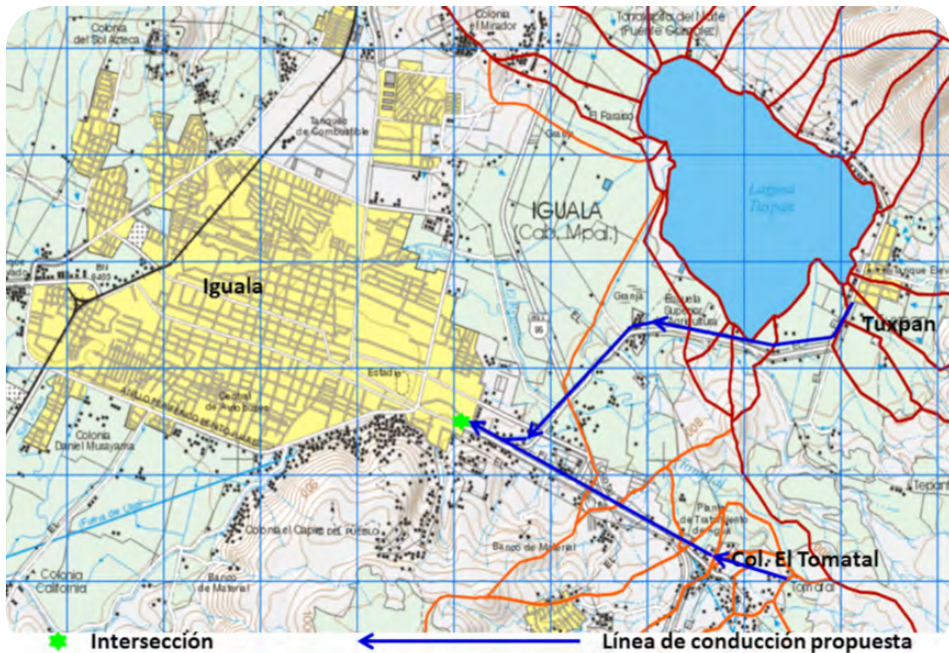


Figura 8.5.3. Línea de conducción de aguas residuales propuesta hacia Iguala (Modificada de IMTA 2013).

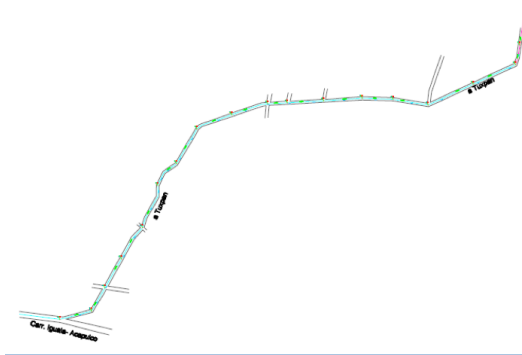


Figura 8.5.4. Colector Tuxpan – Iguala. Longitud aproximada: 4900 m (Modificada de IMTA 2013).

La colonia El Tomatal no cuenta con red de alcantarillado, por lo que para cualquier alternativa de saneamiento es necesario recolectar las aguas residuales. A partir de las imágenes obtenidas por Google Earth se presenta una propuesta de red de alcantarillado (Figura 8.5.5). Para determinar el sentido del escurrimiento se utilizaron las altitudes.



Figura 8.5.5. Red de alcantarillado sanitario. Cárcamo 1 y 2. Plano 1/1 (CAPASEG) (Modificada de IMTA 2013).

A partir de esta propuesta, se considera que para recolectar las aguas que genera esta localidad se necesitan 4350 metros lineales de tubería. Si la propuesta de conducir las aguas residuales a la PTAR Iguala es la alternativa elegida, la longitud del colector para llegar a la intersección es de 2930 m (Figura 8.5.6).

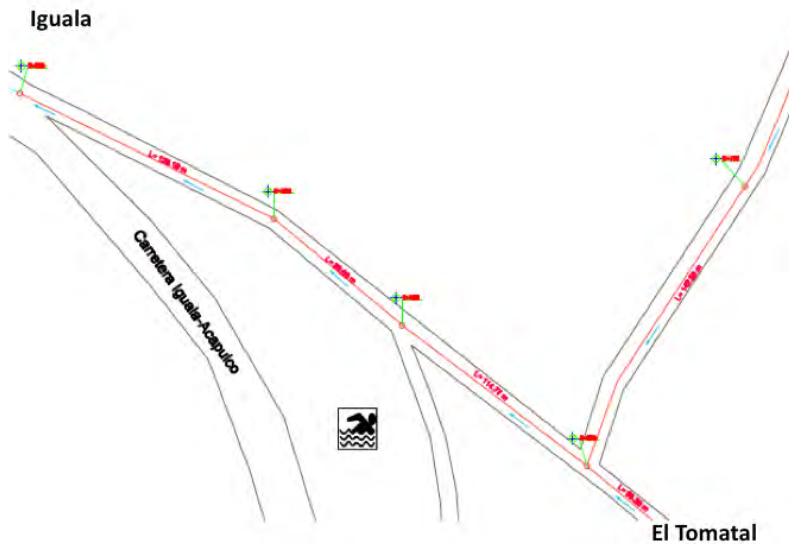


Figura 8.5.6. Colector Tuxpan – Iguala. Longitud aproximada: 4900 m (Modificada de IMTA 2013).

8.6 CONCLUSIONES

Las comunidades de Tuxpan y El Tomatal requieren la instalación de drenajes que permitan la captación y tratamiento de las aguas residuales generadas, ya que la mayor parte de las aguas grises (jabonosas) son vertidas en calles y avenidas, mientras que las aguas sanitarias se descargan hacia fosas sépticas, y no siempre se les da mantenimiento.

Se analizaron diversos esquemas de saneamiento para las dos comunidades. De manera específica, para la comunidad de Tuxpan y tomando en cuenta la configuración topográfica de la zona, se consideró tratar las aguas residuales en tres zonas independientes mediante la instalación de un biofiltro sobre lecho orgánico en cada una de ellas y, de esta manera hacer más económica la instalación y operación, ya que es un sistema de tratamiento de bajo costo de operación y mantenimiento.

El sistema Biosistec® (Biostar-IMTA) también es una tecnología apropiada para ambas comunidades ya que necesita muy poca área para su instalación, pero es importante recalcar que para colocar este sistema los colectores tendrán que dividir los efluentes de manera que cada uno de los reactores instalados reciba una carga hidráulica máxima de 1 L/s, y se debe garantizar el pago de la energía eléctrica para que este sistema opere.

Es necesaria la instalación de drenaje para la conducción de las aguas negras para las dos poblaciones, por lo que se propone aprovechar la capacidad instalada de la PTAR Iguala. Se sugiere hacer la conexión de los drenajes de Tuxpan y El Tomatal en un solo colector general y enviarlo hacia este sistema de tratamiento, utilizando, además, una parte del canal de riego existente, el cual actualmente se encuentra fuera de uso, y hacer conexiones con el drenaje de Iguala. De esta forma, se tendrán menos problemas de operación y mantenimiento en Tuxpan y El Tomatal, si se considera que ambas localidades tienen un índice de marginación alto.

8.7 REFERENCIAS

- CAPASEG, 2013.** *Comisión de Agua Potable Alacantarillado y Saneamiento del Estado de Guerrero.* [En línea] Available at: capaseg.gob.mx [Último acceso: 26 09 2013].
- Chen, X., Chen, G. y Yur, P. L. 2000.** Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, Volume 19, pp. 65-76.
- CONAGUA. 2008.** *Programa Nacional Hídrico 2007 - 2012.* México D.F. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. 2014.** *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación.* México D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Crites, R. y Tchobanoglous, G. 2000.** *Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones.* 1a ed. Santa Fé de Bogotá: McGraw-Hill.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. 2013.** *Estudio para la Identificación de las Causas Niveles y Grado de Contaminación Ambiental en la Laguna de Tuxpan, Guerrero y Propuestas para el Tratamiento de las Aguas Residuales Descargadas en Ella y sus Afluentes.* IMTA-CAPASEG. Informe Final. Tomo II. Convenio CCE.01.04.3.0.2013.-0231. México.
- INEGI, 2009.** *Prontuario de la Información Geográfica Municipal.* s.l. INEGI.
- METCALF & EDDY. 2003.** *Wastewater Engineering Treatment and Reuse.* New York: McGraw-Hill.
- ODIS ASVERSA S.A. de C.V., 2007.** *Informe preventivo de la manifestación de impacto ambiental "Proyecto planta de tratamiento de aguas residuales" Iguala, Guerrero., Iguala, Guerrero:* ODIS ASVERSA S.A. de C.V.
- VALLENTYNE, J.R. 1972.** "Freshwater supplies and pollution: Effects of the demoporic explosion on water and man", en N. Polunin (ed.), *The Environmental Future*, London, Macmillan Press Ltd., pp. 181-211.





CAPITULO 9

Plan estratégico para la recuperación,
manejo y conservación del lago
“Laguna de Tuxpan” en el estado de
Guerrero, México.

EDITORES:

Rebeca González Villela
Leonardo Hernández Barrios

CONTENIDO

Capítulo 9

9.1 INTRODUCCIÓN	327
9.2 ÁREA DE ESTUDIO	329
9.3 MÉTODOS	332
9.4 RESULTADOS	334
9.4.1 <i>Diagnóstico ambiental</i>	334
9.4.1.1 <i>Impacto por la contaminación de descargas residuales</i>	334
9.4.1.2 <i>Impacto por el uso de lavaderos dentro de la Laguna</i>	335
9.4.1.3 <i>Impacto por la ausencia del sistema de saneamiento</i>	337
9.4.1.3.1 <i>Alcantarillado</i>	337
9.4.1.3.2 <i>Fosas Sépticas</i>	338
9.4.1.3.3 <i>Eutroficación del Lago</i>	339
9.4.1.4 <i>Impacto de la calidad del agua en la salud</i>	342
9.4.1.4.1 <i>Cianotoxinas en el lago</i>	342
9.4.1.4.2 <i>Toxicología y contaminación</i>	343
9.4.1.4.3 <i>Residuos Sólidos</i>	343
9.4.1.4.4 <i>Contaminación Difusa</i>	344
9.4.1.4.5 <i>Contaminación de sedimentos por actividades agrícolas (contaminación difusa)</i>	348
9.4.1.4.6 <i>Impacto por el transporte y producción de sedimentos</i>	349
9.4.1.4.7 <i>Erosión Hídrica</i>	350
9.4.1.4.8 <i>Deforestación</i>	351
9.4.1.4.9 <i>Control de Cárcavas</i>	352
9.4.1.4.10 <i>Agroquímicos en la agricultura</i>	353
9.4.1.4.11 <i>Impacto ambiental en la biodiversidad</i>	354
9.4.1.4.12 <i>Impactos por la modificación del cauce del río y corredor fluvial</i>	355
9.4.1.5 <i>Problemas Prioritarios</i>	356
9.4.1.5.1 <i>Disminución de la calidad del agua en la Laguna</i>	357

9.1.5.2 Deterioro de los recursos bosque y suelo	358
9.1.5.3 Crecimiento urbano desordenado	359
9.1.5.4 Rezagos sociales y económicos	359
9.1.5.5 Pobreza e insalubridad	359
9.1.5.6 Deficiencias en cultura ambiental, capacitación productiva, comunicación y participación social	360
9.5 MATRIZ DE ALTERNATIVAS DE ACCIÓN	362
9.6 DISCUSIÓN	374
9.7 CONCLUSIONES	376
9.8 REFERENCIAS	377

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 9.2.1. Infraestructura restaurantera en la comunidad de Tuxpan (Modificada de IMTA 2013).	330
Figura 9.2.2. Infraestructura de viviendas y baldíos en la comunidad de Tuxpan (Modificada de IMTA 2013).	331
Figura 9.2.3. Infraestructura de moteles, escuelas, huertas y salud en la comunidad de Tuxpan (modificada de IMTA 2013).	331
Figura 9.4.1. Ubicación de lavaderos en la Laguna de tuxpan (Modificada de IMTA 2013).	337
Figura 9.4.2. Mapa de población de localidades con sistemas sépticos (Modificada de IMTA 2013).	340
Figura 9.4.3. Ubicación de los sitios con residuos sólidos en la localidad de Tuxpan (Modificada de IMTA 2013).	345
Figura 9.4.4. Valores de la contaminación puntual en la subcuenca de Tuxpan por actividades agrícolas (modificada de IMTA 2013).	346
Figura 9.4.5. Valores de la contaminación puntual en la subcuenca de Tuxpan por actividades agrícolas (modificada de IMTA 2013).	348
Figura 9.4.6. Distribución porcentual de las cárcavas en la subcuenca (modificada de IMTA 2013).	353
Figura 9.4.7. Problemas prioritarios en las subcuencas y Laguna de Tuxpan (modificada de IMTA 2013).	357

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 9.2.1. Estructura básica del plan estratégico para la recuperación ambiental del lago "Laguna de Tuxpan"	329
Cuadro 9.3.1. Ejemplo de matriz de datos para la evaluación de los indicadores, condición actual, tendencia, impactos (ecuación 1) y estrategias de mitigación en cada disciplina	332
Cuadro 9.3.2. Estructura básica del plan estratégico para la recuperación ambiental del lago "Laguna de Tuxpan" (modificada de IMTA 2013).	363
Cuadro 9.3.3. Estructura básica del plan estratégico para la recuperación ambiental del lago "Laguna de Tuxpan" (modificada de IMTA 2013).	366

9.1 INTRODUCCIÓN

La aplicación de nuevas tecnologías ha cambiado el ángulo de apreciación del estudio de los recursos naturales, bajo el supuesto de que la evaluación y el manejo del recurso agua en una cuenca requieren de un enfoque integral y holístico, que considere la cuestión geográfica como uno de sus componentes clave (Cotler 2007).

La etapa de implementación no necesariamente es la más complicada del proceso de manejo, pero seguramente si es la que más recursos económicos y humanos requiere. La distribución equitativa de los costos y los beneficios entre los participantes es de gran ayuda para lograr una adecuada implementación del programa de manejo. Sin embargo, la inequidad económica y social hace muchas veces necesario recurrir a incentivos y subsidios gubernamentales para llevar a cabo el proceso de manejo. Es importante que los recursos financieros tengan un flujo permanente para lograr la sostenibilidad del proceso (Mass 2007).

El manejo de los recursos naturales en la cuenca está relacionado con las políticas públicas, la demanda del mercado y varios modelos de desarrollo que marcan los tipos de aprovechamiento en el tiempo. La incorporación del suelo a las actividades humanas, las obras hidráulicas (presas y bordos), la práctica de sistemas de producción inadecuados que fomentan los procesos de degradación de suelos, y los asentamientos humanos en zonas de riesgo aumentan la vulnerabilidad de la cuenca (Cotler 2007).

No hay gobernabilidad sobre el agua y las cuencas si el sistema político institucional no es lo suficientemente sólido ni sus políticas macroeconómicas consecuentes con todas las tareas a realizar. Los grupos que toman decisiones sobre temas que parecen ajenos al agua y el ambiente, en la práctica afectan a los recursos acuáticos mucho más que el estrecho marco de las decisiones de los expertos del agua y el ambiente. Además, deben considerarse el crecimiento exponencial de las zonas urbanas y de la población en general, el incremento de

la pobreza y la carencia de acceso a la educación y recursos económicos de gran parte de la misma. Para proteger el agua se requiere una visión global de país, de las aguas superficiales y subterráneas, así como de la cuenca, considerando que las alteraciones de los sistemas naturales afectarán los valores económicos y sociales de las comunidades regionales y nacionales (Dourojeanni 2007).

El bienestar social, el desarrollo económico y la preservación del medio son los componentes de una serie de interacciones y objetivos complementarios que deben sintetizar el desarrollo sustentable, el cual riga el manejo de los recursos naturales y orienta el cambio de tal manera que asegure la satisfacción continua de las necesidades humanas para las generaciones presentes y futuras (Valencia et al. 2007).

La sensibilización de la población sobre la importancia de aprovechar racional y eficientemente sus recursos, es un componente importante para la rehabilitación y conservación de los recursos naturales, puesto que son la base para disponer de insumos, servicios y satisfactores que detonarán el desarrollo económico, propiciando oportunidades de empleo e ingreso permanente a los habitantes de las microcuencas. Se debe atender, por lo tanto, la pérdida de biodiversidad, la degradación de los recursos naturales y los problemas con la cantidad y calidad del agua (Casillas 2007).

En las últimas décadas, las subcuencas de los ríos El Tomatal y Tuxpan, así como del lago “Laguna de Tuxpan”, se han deteriorado ambientalmente. Entre los principales problemas de la región están la erosión del suelo y los escurrimientos con sedimentos de las tierras altas deforestadas (se estima que 50% del área presenta erosión hídrica, desde ligera hasta severa, así como formación de cárcavas); reducción de la superficie y profundidad del lago; proliferación de efluentes de agua residual municipal en la subcuenca del río El Tomatal, principalmente; el lavado de ropa en la orilla del lago por parte de visitantes y pobladores de Tuxpan; así como el desalojo de desechos de los restaurantes ubicados en la rivera del lago y los aportes difusos de contaminantes agropecuarios en las microcuencas que integran la subcuenca Tuxpan-Tomatal que, en conjunto, hacen necesaria la determinación del origen, nivel y grado de contaminación del lago para generar un plan estratégico de manejo, recuperación y conservación del cuerpo de agua, debido a la importancia ambiental y socioeconómica que representa para los pobladores de la región y para satisfacer las necesidades primordiales de las generaciones presentes y futuras.

9.2 ÁREA DE ESTUDIO

La economía en los alrededores del lago depende principalmente de la pesca y del comercio del mango. Otras actividades son el turismo (restaurantes en la rívera del cuerpo de agua), la ganadería (pastoreo de bovinos y caprinos), la agricultura de temporal (cacahuete, maíz, sorgo) y de riego (hortalizas, flores y frutales). Además, el lago tiene atractivo turístico debido a las carreras de motos acuáticas y el torneo acuático “Nauticopa”.

Las localidades con mayor población en la subcuenca son Tuxpan y El Tomatal (2,086 y 1,245 habitantes, respectivamente). Le siguen las comunidades de Topochica y Rancho del Cura con 740 y 699 habitantes, entre otras. En el Cuadro 9.2.1 se muestran características de algunas localidades, su población y el grado de marginación.

Cuadro 9.2.1. Estructura básica del plan estratégico para la recuperación ambiental del lago “Laguna de Tuxpan”.

Municipio: Iguala de la Independencia. Gro.			
Subcuenca	Nombre de la localidad	Población Total	Grado de marginación 2010.
Subcuenca Tuxpan	Platanillo	299	Alto
Subcuenca Tuxpan	Tuxpan	2,086	Alto
Subcuenca Tuxpan	La Compuerta de la Laguna de Tuxpan	17	Muy alto
Subcuenca Tuxpan	CERESO	544	Alto
Subcuenca Tuxpan	Puente González Uno (Colonia los Manantiales)	10	Muy alto
Subcuenca Tuxpan	Colonia Renacimiento	250	Alto
Subcuenca Tuxpan	Puerto del Aire	18	Muy alto

Municipio: Iguala de la Independencia, Gro.			
Subcuenca	Nombre de la localidad	Población Total	Grado de marginación 2010.
Subcuenca El Tomatal	Colonia Rancho del Cura (El Cura)	699	Alto
Subcuenca El Tomatal	Tepochica	740	Alto
Subcuenca El Tomatal	Los Guajes	6	Muy alto
Subcuenca El Tomatal	Las Granjas	37	Alto
Subcuenca El Tomatal	El Tomatal	1,245	Alto

Fuente: INEGI. Censo 2010. Grado de marginación de las principales localidades en las subcuencas El Tomatal y Tuxpan.

El turismo cuenta con restaurantes localizados en el entorno del lago que generalmente no cuentan con sistemas de tratamiento de sus efluentes, por lo que sus aguas residuales van a las fosas sépticas o al lago. Esto contribuye a la contaminación del lago junto con el transporte de sedimentos y las descargas residuales al río El Tomatal (Figuras 9.2.1 a la 9.2.3). Asimismo, se encuentra una serie de viviendas y baldíos alrededor del lago, así como moteles, escuelas, huertas y centros de salud que contribuyen con la generación de basura y otros contaminantes. La actividad pecuaria también afecta directamente al lago.

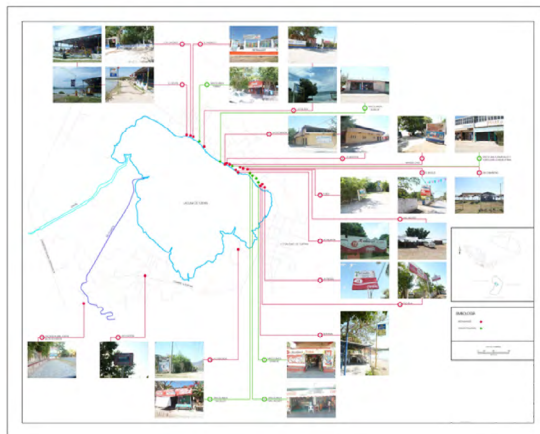


Figura 9.2.1. Infraestructura restaurantera en la comunidad de tuxpan (Modificada de IMTA 2013).

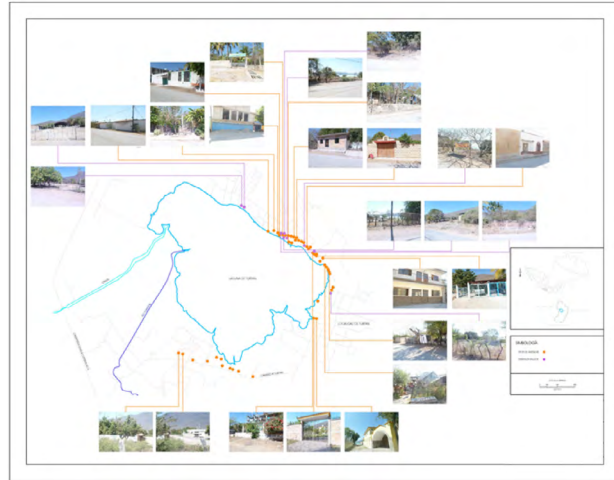


Figura 9.2.2. Infraestructura de moteles, escuelas, huertas y salud en la comunidad de Tuxpan (Modificada de IMTA 2013).

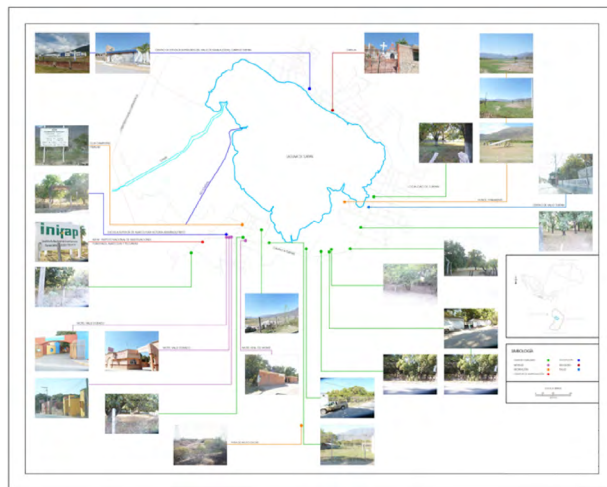


Figura 9.2.3. Infraestructura de moteles, escuelas, huertas y salud en la comunidad de Tuxpan (modificada de IMTA 2013).

9.3 MÉTODOS

Los indicadores de impacto ambiental fueron evaluados por expertos en cada disciplina. Las causas y efectos relativos entre los factores de estrés y los indicadores clave, los cambios temporales en el uso de la tierra, la erosión, la contaminación difusa, el caudal, el estado del corredor fluvial, la calidad del agua del río y del lago, la contaminación y toxicología, así como los factores socioeconómicos en el área de las subcuencas, fueron evaluados acorde con la metodología sugerida por cada disciplina y mediante sistemas de información geográfica (GIS), con la información obtenida de: 1) indicadores de impacto sugeridos por cada disciplina, 2) estado actual del indicador, 3) tendencias y escenarios, 4) medidas de mitigación para cada indicador. Acorde con la metodología sugerida por Bojórquez (1989), Cloquell-Ballester al., (2007) como se indica en el Cuadro 9.3.1.

Cuadro 9.3.1. Ejemplo de matriz de datos para la evaluación de los indicadores, condición actual, tendencia, impactos (Ecuación 1) y estrategias de mitigación en cada disciplina

Indicadores de Impacto	Condición Actual	Tendencias	Cambios	N	I	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MO	IA	Mitigación

$$IA = \pm (3I+2EX+MO+PE+RV+SI+AC+EF+PR+MC) \quad (1)$$

Donde:

- IA Impacto Ambiental.
- N= Naturaleza.- Benéfica o perjudicial (\pm).
- I = Intensidad.- Grado de incidencia (máximo valor 12).
- EX= Extensión.- radio de 10 km = parcial. Extenso = para una o varias comunidades (SAR). Crítico = todo el Sistema Ambiental Regional.
- MO= Momento. Plazo de manifestación del efecto.
- PE= Persistencia. <1 año = fugaz; 1 y 10 años = temporal; + de 10 años = permanente.
- RV= Reversibilidad.- Posibilidad de reconstrucción.
- SI= Sinergia.- Reforzamiento de efectos simples.
- AC= Acumulación.- Incremento progresivo.
- EF= Efecto.- Directo-primario, indirecto-secundario.
- PR= Periodicidad.- Intermitente o discreto, periódico o estacional.
- MC= Recuperabilidad (+); Irrecuperabilidad (-).

Cada impacto fue emitido por cada experto a través de una evaluación “atributo por atributo”, tomando en consideración la consistencia en las evaluaciones (desviación estándar evaluada por cada experto) y consenso (grado de acuerdo entre los interesados) en forma similar a la metodología multicriterio utilizada por Bojórquez-Tapia et al. (2005).

9.4 RESULTADOS

9.4.1 Diagnóstico ambiental

9.4.1.1 Impacto por la contaminación de descargas residuales

Las causas principales del deterioro de la calidad del agua del lago son: las descargas que se vierten al río El Tomatal con un arrastre importante de sedimentos, los residuos sólidos, las heces fecales, las grasas y aceites y algunos nutrientes contenidos en los sedimentos. Estos últimos también contribuyen a la contaminación de los acuíferos en las zonas aledañas al lago y pozos de infiltración. Otra aportación importante es la generada por las fosas sépticas que se infiltran al manto freático contaminando el agua subterránea.

Los pobladores de El Tomatal descargan sus aguas residuales directamente a las calles y avenidas debido a la falta de un sistema colector en la comunidad. Otras viviendas ubicadas cerca del cauce descargan sus aguas residuales directamente al río. Algunas viviendas cuentan con fosa séptica, por lo que sus descargas (aguas jabonosas y/o sanitarias) perfunden hacia el subsuelo. Todas las descargas, ya sean directas o de las fosas sépticas, llegan al lago porque se encuentra aguas arriba sobre el cauce del río.

Las descargas de la comunidad El Tomatal se agrupan o confluyen principalmente en tres sitios. Estas descargas presentan olor característico a efluentes de tipo municipal. También se observaron diferentes tipos de residuos sólidos urbanos, entre los que destacan los plásticos y diversos envases de medicamentos.

Aguas abajo del cauce del río Tomatal y antes de llegar a la comunidad de Tuxpan, se encuentra el CERESO, que cuenta con una fosa séptica para evitar que las heces lleguen directamente al río. Sin embargo, se puede apreciar que tiene una descarga de agua residual directa hacia el río. Después del CERESO y siguiendo el curso del río, poco antes de llegar a la comunidad de Tuxpan, se observan

algunos puntos de descarga de aguas residuales, éstas se encuentran a una distancia de 2,429 metros antes del lago. Los resultados de los análisis de calidad del agua indican que el río se encuentra contaminado por coliformes fecales a causa principalmente de las descargas generadas en la localidad de El Tomatal.

Medidas de Mitigación

El grado de contaminación del río por la presencia de materia orgánica se encuentra por debajo de la norma y del índice de calidad del agua, sin embargo, es indispensable:

1. Instalar colectores (alcantarillado) de aguas residuales para conducir las hacia un sistema de tratamiento o a la red de drenaje, para impedir que las descargas se sigan arrojando directamente hacia el río.
2. Construir un sistema descentralizado para el tratamiento y desinfección de las aguas residuales, ya que de acuerdo a su caracterización, las aguas residuales de la colonia El Tomatal presentan un alto contenido de materia orgánica, coliformes fecales, huevos de helmintos, grasas y aceites.

9.4.1.2 Impacto por el uso de lavaderos dentro de la Laguna

En el interior del lago se encuentran alrededor de 78 lavaderos públicos. Esta práctica atiende a una necesidad económica y social y a la carencia de servicios de agua y saneamiento dentro de las casas. Como lo demuestran las encuestas, en estos lavaderos lavan ropa las mujeres, en su mayoría de la Ciudad de Iguala y unas pocas de la comunidad de Tuxpan. Este tipo de lavado es frecuente a pesar de estar prohibido. Esta práctica provoca contaminación difusa por detergentes, y suavizantes, que contribuyen con fosfatos y tenso activos, y químicos como el cloro. Además, al momento de realizar el lavado de sus prendas, se vierten residuos de fibras textiles, colorantes, así como grasas y aceites. Por otra parte, el lavado de pañales y ropa interior aporta patógenos.

La acumulación de fosfatos en el lago por el lavado de la ropa, con el tiempo pueden provocar la eutrofización del lago, originando la proliferación de plantas acuáticas no deseables, consideradas como plaga, como son los lirios acuáticos, que tienen la capacidad de expandirse por toda la superficie del cuerpo de agua y, eventualmente, evitan el paso de luz en el perfil vertical impidiendo el proceso fotosintético. Esto da como resultado una disminución del contenido de oxígeno disuelto en la columna de agua e incrementa el estado anóxico, situación que puede provocar la muerte de la flora y fauna del lago.

Asimismo, las mujeres están expuestas a la misma contaminación que provocan, debido a que para lavar meten su cuerpo hasta la cintura dentro del lago. Los niños que las acompañan también están expuestos a la misma contaminación. Además, en la zona no se cuentan con servicios sanitarios (Figura 9.4.1).

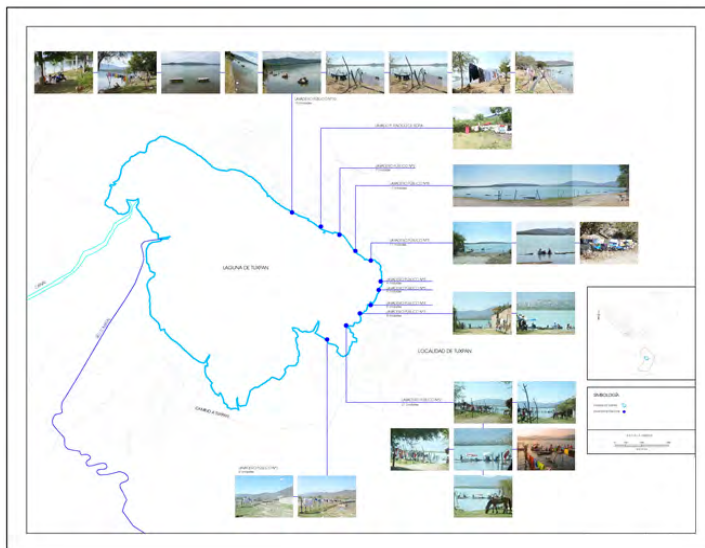


Figura 9.4.1. Ubicación de lavaderos en la Laguna de Tuxpan (modificada de IMTA 2013).

Medidas de Mitigación:

1. Instalar un módulo de lavaderos ecológicos comunitarios para lavar la ropa en tierra firme.
2. Un vermifiltro-humedal para el tratamiento de las aguas jabonosas provenientes de los lavaderos en tierra firme.
3. Lavaderos y regaderas en lugares estratégicos para uso de las lavanderas.
4. Letrinas secas para la disposición de excretas.
5. Sistema de captación, filtración y almacenamiento de agua de lluvia, aprovechando la precipitación anual de 989.8 mm en la región.

9.4.1.3 Impacto por la ausencia del sistema de saneamiento

9.4.1.3.1 Alcantarillado

Las comunidades de El Tomatal y Tuxpan no cuentan con un sistema de drenaje. De acuerdo con información de los comisarios ejidales de las dos comunidades, la mayor parte de la población cuenta con fosa séptica. Esta información corresponde con la reportada por el INEGI en el censo del 2010.

Para el saneamiento de las aguas residuales, requieren de la construcción de una red de drenaje, que permita la captación y conducción a un sistema de tratamiento de las aguas generadas. Actualmente, en la localidad de El Tomatal, son vertidas a calles y avenidas, para después escurrir hacia las pequeñas barrancas, transportando gran cantidad de contaminantes que repercuten en la calidad del agua. En la localidad de Tuxpan las aguas residuales terminan mayoritariamente en una fosa séptica y es frecuente que las aguas grises se viertan hacia el exterior de las viviendas, siendo necesario resolver de manera ordenada y escalonada el problema sanitario-ambiental por la ausencia de un sistema de alcantarillado. Es imprescindible la instalación de un sistema de drenaje, de manera que sea posible captar y conducir todas las aguas residuales generadas por la población.

Medidas de Mitigación:

- 1.- Instalar una red de alcantarillado para recolectar las aguas residuales y conducir las a sistemas descentralizados o para enviarlas a la PTAR Iguala
- 2.- Una línea de conducción de aguas residuales hacia la ciudad de Iguala.

9.4.1.3.2 Fosas Sépticas

La mayoría de las viviendas de las comunidades El Tomatal y Tuxpan cuentan con fosa séptica, no obstante, esta fosa comúnmente está destinada para aguas de tipo sanitario, el resto de agua residual generada conocida como aguas grises (jabonosas), escurren hacia las barrancas que atraviesan la comunidad para posteriormente incidir en el río que desemboca al lago. En algunos casos, las aguas grises son vertidas directamente a las calles, bajo el razonamiento de que las fosas instaladas en las viviendas no tienen la capacidad suficiente para almacenar tanto aguas sanitarias como las grises. La Figura 9.4.2, muestra la distribución de las poblaciones en la cuenca que tienen fosas sépticas.

Medidas de Mitigación:

1. La instalación de un sistema de tratamiento a base de lodos activados convencional y/o sistemas equivalentes.

9.4.1.3.3 Eutroficación del Lago

El manejo de los recursos naturales ha degradado las cuencas hidrográficas en estudio, situación agravada por el aumento de las descargas de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales, que incrementan el vertido de nutrientes y contaminantes a los ríos y, posteriormente, al lago y a la presa, lo que deteriora la calidad del agua y su aprovechamiento integral. El aporte excesivo de residuos, la

erosión de la tierra productiva, la deforestación de las cuencas y la contaminación de las aguas junto con la falta de una planificación y manejo integrado de los recursos compromete la sostenibilidad de estos ecosistemas.

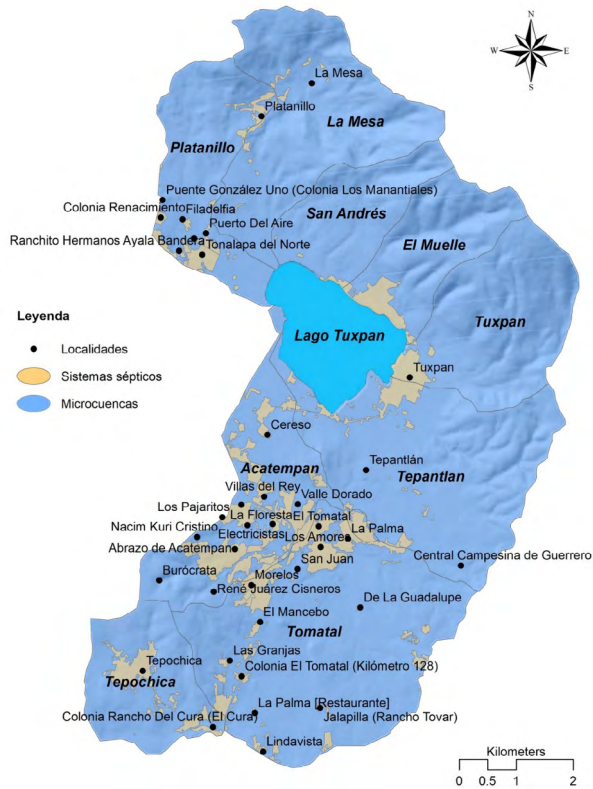


Figura 9.4.2. Mapa de población de localidades con sistemas sépticos (modificada de IMTA 2013).

Fuente: INEGI(2013) continuo de elevación mexicano 3.0. inegi (2012) municipio y censo de población y vivienda 2010.

La creciente influencia antropogénica caracterizada por el vertido de aguas residuales de las casas y detergentes de los lavaderos dentro del lago, la deforestación y la erosión del suelo, la actividad restaurantera en las orillas y el abrevadero de ganado en las márgenes del lago, concentran sólidos suspendidos y disueltos en la columna de agua generando una ligera turbidez indicadora de una eutrofización insipiente.

El término eutrofización cultural se refiere, desde hace tres décadas, al aporte acelerado e indeseable de nutrientes, especialmente fósforo (P) y nitrógeno (N), cuyo efecto se manifiesta en una intensa proliferación de algas y/o de las plantas acuáticas vasculares (hidrofitas) que, junto con el aporte de materia orgánica, sólidos y otros elementos químicos, son los causantes de cambios en la calidad del agua y la consecuente alteración de las comunidades acuáticas.

El pH, la alcalinidad, la conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto en el lago se acercan al límite máximo permitido por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua para la Protección de la Vida Acuática (PVA), mientras que la DBO_5 la ubica en una calidad entre buena a aceptable, acorde con las Metas de Calidad del Agua. La DQO refleja un mayor nivel de contaminación. La dureza total en el lago va de aguas blandas (en lluvias), a aguas ligeramente duras (en secas). Las grasas y aceites presentan valores bajos en lluvias y altos en la época de secas, indicando estrés para la vida acuática del sistema. Los fosfatos totales, el nitrógeno amoniacal y las coliformes fecales no cumplieron con los Criterios Ecológicos para la PVA.

La clasificación de los lagos cálidos tropicales y el Índice de Estado Trófico (IET), en función del fósforo total, el nitrógeno total y el disco de Secchi, le dan una alta probabilidad al lago para ser catalogado como meso-eutrófico. Además, considerando la morfometría y el color del agua, se estima que el grado trófico va en aumento debido al nivel de contaminación del río Tomatal y a las diversas actividades antropogénicas en el entorno del lago.

Medidas de Mitigación

Para proteger la calidad del agua del lago, así como la integridad ambiental de su cuenca, se sugiere:

1. Monitorear al lago y al río El Tomatal actualizando el estudio limnoló-

gico, así como a las subcuencas mediante los SIG, para desarrollar una diagnosis-factibilidad de rehabilitación y prevenir o controlar la eutroficación y el deterioro gradual del lago.

2. Controlar las descargas de aguas residuales hacia el río El Tomatal.
3. Conservar el corredor fluvial de El Tomatal.
4. Evitar el vertido de basura orgánica y no orgánica de los pobladores de las subcuencas de Tuxpan y El Tomatal.
5. Re-encausamiento del río El Tomatal por los campos del INIFAP, y canal de llamada para recuperar la condición original del lago.

9.4.1.4 Impacto de la calidad del agua en la salud

9.4.1.4.1 Cianotoxinas en el lago

Las cianotoxinas constituyen un grupo de sustancias químicas con mecanismos concretos de toxicidad en los vertebrados. Su diversidad incluye a las cianotoxinas (neurotoxinas fuertes como la anatoxina y la saxitoxina); Otras hepatotóxicas (como la microcistina, la nodularina y la cylindrospermopsina); y otras que parecen causar gastroenteritis (como los lipopolisacáridos). Geográficamente, la microcistina presenta la distribución más amplia en agua dulce. Estas toxinas han sido relacionadas con la muerte de animales y problemas de salud humana. El riesgo para la salud humana puede estimarse por el conocimiento toxicológico en combinación con información sobre su aparición (Tomasini-Ortiz, et al. 2012a).

De acuerdo a los valores guía de la OMS para los microgramos por litro de Microcistina-LR en los cuerpos de agua, aplicando el método ELISA, la probabilidad relativa de efectos agudos para la salud (PREAPS) no fueron detectados en ninguno de los sitios de muestreo en el lago, lo que indica la ausencia de la toxina. Sin embargo, según el número de células por mililitro de cianofitas, la PREAPS en los sitios E-1, E-2 y E-3, es moderada, y en los sitios E-4 y E-5 es baja. Según los

microgramos por litro de clorofila, el sitio E-2 tiene una PREAPS moderada durante el periodo de lluvias; en los sitios E-1; E-2; E-3 y E-5 se tiene una PREAPS baja; y durante el periodo de secas, en los cinco sitios se presentó una PREAPS baja.

Medidas de Mitigación:

1. Controlar las descargas de aguas residuales en El Tomatal.
2. Conservar el corredor fluvial del río El Tomatal
3. Controlar el vertido de basura orgánica e inorgánica.
4. Aplicar modelos físicos y ecológicos en el desarrollo y ejecución de las estrategias de manejo, conservación y recuperación de los cuerpos de agua.
5. Re-encausamiento del río El Tomatal por los campos del INIFAP, y canal de llamada para recuperar la condición original del lago.

9.4.1.4.2 Toxicología y contaminación

Los análisis en el lago en la época de lluvias no presentaron niveles detectables de los distintos grupos de agentes contaminantes, tanto de metales pesados como de contaminantes orgánicos como los volátiles, semivolátiles, plaguicidas organoclorados, carbamatos y PCB's, por lo que están ausentes en agua y sedimentos. Sin embargo, en los sedimentos del lago se detectaron Dimetilftalato, Dibutilftalato y Etilhexilftalato, en niveles de 0.07 a 0.56 ppm (mg/kg), además de los ácidos ftálicos dodecil éster y butiléster en concentraciones de 0.0033 y 0.0037 ppm ($\mu\text{g/L}$), y otros 13 compuestos, entre ellos ácidos grasos, ésteres, hidrocarburos aromáticos, esteroides y alquenos, todos asociados a las descargas residuales municipales, a la contaminación fecal antropogénica y al plástico de la basura.

Debido a la baja concentración de las sustancias encontradas, no se detectaron efectos tóxicos en los organismos de prueba empleados en la batería multi-trófica integrada por la bacteria *Vibrio fischeri*, al alga *Pseudokirchneriella subcapitata* y el cladóceros *Daphnia magna*.

Medidas de Mitigación:

1. Monitorear al lago y al río El Tomatal actualizando el estudio limnológico, así como a las subcuencas mediante SIG, para desarrollar una diagnosis-factibilidad de rehabilitación y prevenir o controlar la eutroficación y el deterioro gradual del lago.
2. Control del vertido de basura al río (todo tipo de plásticos).
3. Campañas de educación ambiental para el control de las descargas de aguas municipales al río por la población.
4. Cambio de agroquímicos menos contaminantes en la zona agrícola.
5. Re-encausamiento del río El Tomatal por los campos del INIFAP, y canal de llamada para recuperar la condición original del lago.

9.4.1.4.3 Residuos Sólidos

Los residuos sólidos se encuentran en las localidades del El Tomatal y Tuxpan en tiraderos a cielo abierto en diversos sitios de la parte alta noroeste de la localidad, y en algunas barrancas cercanas al cauce del río. Los residuos generan lixiviados que se infiltran a los mantos freáticos y escurren por las barrancas hacia el lago (Figura 9.4.3). El comisario ejidal afirma que la recolección de residuos sólidos se efectúa en brigadas quincenales apoyadas por la Secretaría de Servicios Públicos Municipales. Los pobladores tienen una retroexcavadora para desazolver los cauces y barrancas principales que conducen los escurrimientos al lago.

Medidas de Mitigación

1. Continuar con las brigadas de recolección apoyadas por la Secretaría de Servicios Públicos Municipales.
2. Generar un plan de educación ambiental para la población.

9.4.1.4.4 Contaminación Difusa

La contaminación difusa proviene de fuentes no puntuales, como la infiltración hacia las aguas subterráneas de nitratos derivados de las actividades agrícolas. Junto con las fuentes puntuales de los drenes agrícolas y los desechos de agua de las zonas urbanas, introducen una cantidad significativa de contaminación al medio acuático (Campbell et al. 2006).

Para determinar la contaminación difusa, se delimitaron las dos subcuencas de estudio, Tuxpan y El Tomatal que, a su vez, se dividieron en nueve microcuencas, en las que se evaluaron las cargas (kg/día) de nitrógeno (N) y fósforo (F) de las localidades de cada microcuenca (Figura 9.4.4 y 9.4.5). La subcuenca del río El Tomatal, en la zona sur, aporta la mayor cantidad de nutrientes por fuentes difusas debido a que su población y zona agropecuaria son mayores. La subcuenca del lago de Tuxpan presenta mayor aporte de fuentes puntuales debido a que su población y actividad agropecuaria son menores, y los pastizales y el bosque tropical presentan mayor extensión.

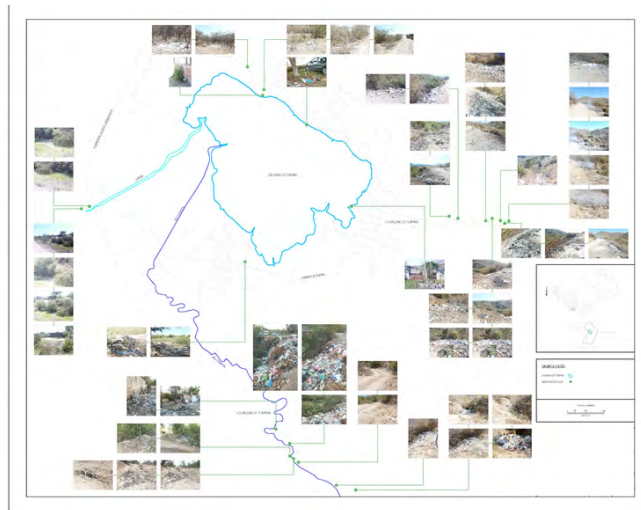


Figura 9.4.3. Ubicación de los sitios con residuos sólidos en la localidad de Tuxpan (modificada de IMTA 2013).

Entre las dos subcuencas se generan 107.012 Kg anuales de N, de las cuales 24.54 Kg provienen de fuentes puntuales (22,93%) y 82.47 Kg de fuentes difusas (77,07%). Además, las subcuencas generan 14.79 Kg de P, de las cuales 2.36 Kg (15.99%) provienen de fuentes puntuales, y 12.42 Kg (84.01%) de fuentes difusas.

Respecto a la aportación de nitrógeno total (suma de fuentes puntuales y difusas), la cuenca del río Tomatal genera 53.66 Kg anuales (50,14%), y la cuenca del lago de Tuxpan (zona centro norte) 53.35 Kg anuales (49,86%).

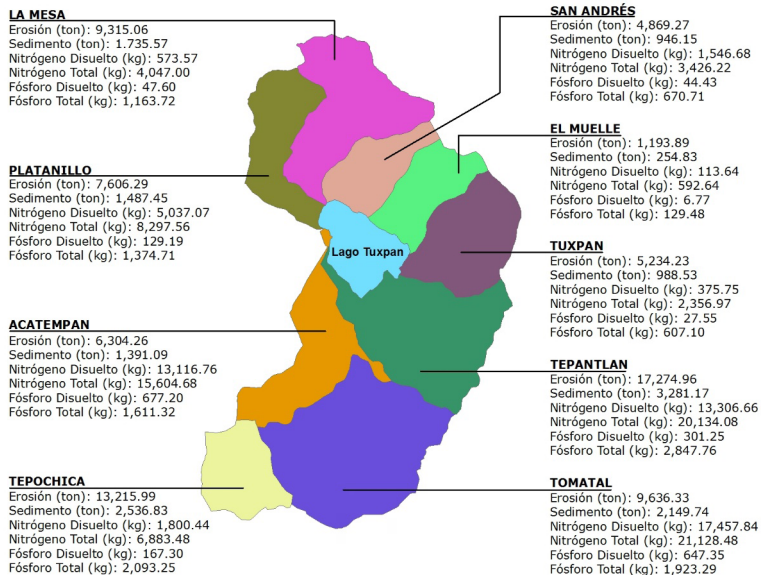


Figura 9.4.4. Valores de la contaminación difusa en las subcuencas de Tuxpan y El Tomatal (modificada de IMTA 2013).

Por orden de magnitud respecto al aporte anual de nitrógeno por microcuenca, la de Tepantlán aporta 23.93 Kg (22.36%); la del Tomatal 22.16 Kg (20.71%); la de Tepochica 15.82 Kg (14.78%); la de Acatempan 15.67 Kg (14.65%); la de La Mesa 8.19 Kg (7.66%); la de San Andrés 3.34 Kg (3.45%) y la microcuenca de El Muelle 1.130 Kg (11.06%).

Con relación a la generación de P total anual, la cuenca de la Laguna de Tuxpangenera 7.804 Kg (52.78%), y la cuenca del río El Tomatal 6.98 Kg (47.22%). Por microcuenca, los aportes anuales son: Tepantlán con 3.16 Kg (21.36%); Tepochica con 3.07 Kg (20.79%); Tomatal con 2.28 Kg (15.45%); Platanillo con 1.648 Kg (11.15%); Acatempan con 1.62 Kg (10.97%); La Mesa con 1.27 Kg (8.62%); Tuxpan con 8.81 Kg (5.96%); San Andrés con 6.92 Kg (4.68%); y El Muelle con 1.5 Kg (1.02%).

Esto implica que en ambas subcuencas predominan las fuentes difusas como aportadoras de nutrientes. La agricultura aporta el 31.44% del N, las aguas subterráneas el 24.66%, los bancos de escurrimientos el 15.99%, la actividad pecuaria el 9.13%, los sistemas sépticos el 6.63%, y las fuentes puntuales el 22.93%. Respecto al P, la actividad agropecuaria aporta el 71.81%, los sistemas sépticos el 7.05%, las aguas subterráneas el 3.93% y las fuentes puntuales el 15.99%. Por lo tanto, aproximadamente el 80.01% del N y el 11.99% del P proviene de las subcuencas y es retenido en el sedimento y nutrientes del lago, generando el problema de eutroficación.

Medidas de Mitigación

1. Manejar las microcuencas degradadas mediante programas de promoción y adopción de prácticas conservacionistas para terrenos de ladera, donde se realizan actividades agrícolas, acompañados de represas en los cauces para controlar los sedimentos y los escurrimientos ayudando a la infiltración para la recarga del acuífero.
2. Instalar un sistema de drenaje en el poblado, de manera que sea posible captar toda el agua residual generada por la población.

3. Controlar los agroquímicos y substituirlos por otros menos contaminantes.
4. Mejorar el manejo de los desechos derivados de la población.
5. Reforestar el corredor fluvial con plantas nativas para regular el caudal natural del río El Tomatal.
6. Controlar la invasión humana de los corredores fluviales y la contaminación de origen humano, y
7. Aplicar modelos físicos y ecológicos en el proceso de desarrollo y ejecución de las estrategias de manejo, conservación y recuperación de los cuerpos de agua.

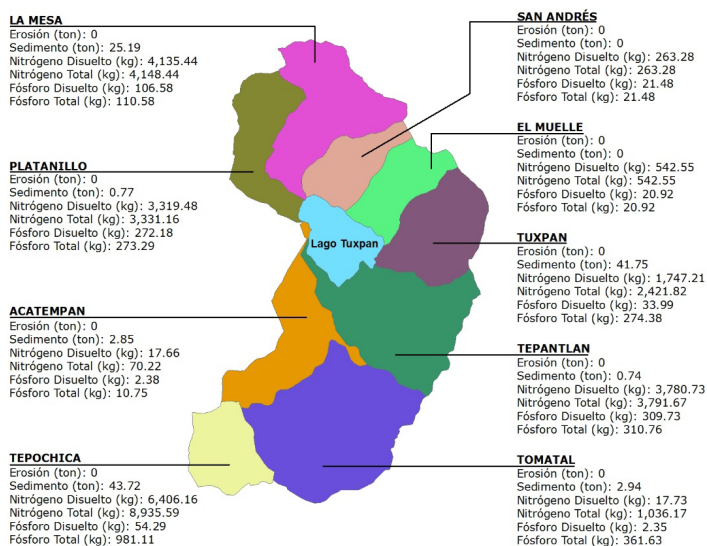


Figura 9.4. 5. Valores de la contaminación puntual en las subcuencas de Tuxpan y El Tomatal por actividades agrícolas (modificada de IMTA 2013).

9.4.1.4.5 Contaminación de sedimentos por actividades agrícolas (contaminación difusa)

El río El Tomatal presenta alteraciones químicas causadas directamente por las actividades agrícolas a través del incremento de sedimentos, pesticidas y nutrientes, así como por las actividades urbanas (contaminantes agroquímicos y desechos municipales). Estas alteraciones han generado el incremento de la materia orgánica y de coliformes fecales. Para disminuir estos efectos se debe generar una estrategia para el uso de agroquímicos menos contaminantes y desarrollar una manejo conveniente de los desechos derivados de la población.

Medidas de Mitigación

Para mitigar el efecto de los contaminantes por el transporte de sedimentos al lago, se sugiere:

1. Substituir los agroquímicos por otros menos contaminantes,
2. Controlar la erosión de las laderas de las microcuencas,

9.4.1.4.6 Impacto por el transporte y producción de sedimentos

Las microcuencas que se encuentran más erosionadas y con una gran cantidad de cárcavas son Tepantlan, Topochica y Tomatal. Los materiales removidos ingresan al afluente (río El Tomatal), atraviesan las subcuencas de Tuxpan y El Tomatal e impactan en las partes bajas, especialmente en el lago, mediante un proceso de sedimentación y azolve.

La zona del lago que corresponde a la desembocadura del río El Tomatal, presenta una merma en su profundidad (2.0 m), debido a la acumulación de sedimentos, lo que ha originado una pérdida de la capacidad de almacenamiento como lo indican los resultados de la batimetría (Capítulo 5). La costa noroeste del lago también ha disminuido su profundidad en la entrada del Canal de Llamada, mientras que la margen sureste aparece como zona de estabilización de la distribución de sedimentos en la Laguna.

Los resultados muestran que las microcuencas presentan diferencias en la producción de sedimento, sobre todo por particularidades relacionadas con el uso predominante del suelo. Las microcuencas de la subcuenca de Tuxpan, presentan las menores tasas de escurrimiento (mm), y de producción de sedimentos, y aunque el escurrimiento es máximo por las pendientes elevadas de los cauces, llega al lago sin sedimentos y el agua prácticamente “limpia”, abasteciéndolo y manteniendo su volumen.

La subcuenca del río El Tomatal produce en promedio 18.7 t de sedimento anualmente, que equivalen a un aporte de $7.45 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de todas sus microcuencas. Estos sedimentos ingresan al lago, resaltando el hecho de que los productores no aplican prácticas de conservación del suelo en los sistemas de producción.

Medidas de Mitigación

1. Impulsar un programa de promoción y adopción de prácticas conservacionistas para terrenos de ladera (Surcado al contorno, Barreras vivas, Barreras de piedra, Terrazas de banco, Represas de piedra acomodada, Represas de geo-costales, Presas de gaviones) y reforestación.
2. Construir represas dentro de los cauces para controlar los escurrimientos y sedimentos, contribuyendo a la infiltración y recarga del acuífero.

9.4.1.4.7 Erosión Hídrica

La erosión hídrica es un fenómeno físico que tiene implicaciones socioeconómicas debido a que ejerce una fuerte presión sobre los recursos naturales (destrucción de bosques y limitación al desarrollo de cultivos en sitios con alta pendiente donde se incrementa el nivel de erosión) además de los problemas causados en las partes bajas donde se depositan las partículas.

En la subcuenca del lago la erosión es nula en el 73.84% de la superficie, con áreas cubiertas por selva baja y bosque de diferentes especies, además, las zonas agrícolas presentan pendiente suave, siendo la erosión hídrica menor res-

pecto a las zonas de riego. Sin embargo, el 9.94% de la superficie presenta tasas de erosión que superan las 10 t ha⁻¹ año⁻¹ (moderada) llegando a 50 t ha⁻¹ año⁻¹, donde la producción agrícola se realiza sobre pendientes moderadas pero sin manejo conservacionista del suelo. También presenta áreas con cubierta de selva baja, pero donde la erosión hídrica ha sido continua y avanza gradualmente formando cárcavas de diferentes profundidades que con el paso del tiempo incrementan sus dimensiones y van mermando la cubierta vegetal.

Aunque predomina la erosión nula, preocupa que el 13.50% de la superficie presenta tasas que superan las 50 t ha⁻¹ año⁻¹, se trata de tasas altas y muy altas que indican una elevada degradación de suelo, con pérdida de la capa arable, en parcelas agrícolas ubicadas en laderas con pendientes que superan el 15%, y también en zonas de pastizales o de selva baja donde la cubierta vegetal es escasa con presencia de cárcavas.

También preocupan las parcelas que se encuentran cerca de los cauces de la red hidrográfica, cuyos sedimentos se integran de inmediato al escurrimiento y son transportados aguas abajo afectando la infraestructura hidroagrícola y azolvando finalmente al lago. Se puede apreciar que la microcuenca de Topochica presenta la mayor erosión hídrica, seguida de la de El Tomatal, con tasas de erosión mayores a 200 ton/ha/año.

Medidas de Mitigación

1. Reforestación.
2. Control de cárcavas.
3. Siembra de cultivos en terrazas.

9.4.1.4.8 Deforestación

Gran parte de la deforestación se ha realizado en las microcuencas de Topochica y Tomatal, por lo que se recomienda establecer un proyecto de reforestación integral, implementando viveros de plantas nativas. En la localidad de Tuxpan se presenta deforestación en la parte alta del cerro que se encuentra en la zona norte del lago, debido al proceso de lotificación, sin que se cuente con un programa

regional de ordenamiento territorial para la zona. En esta subcuenca son pocas las prácticas conservacionistas que se llevan a cabo y la reforestación solamente se ha realizado en la microcuenca del Platanillo.

Medidas de Mitigación:

Para evitar el alto índice de transporte de sedimentos se sugiere:

1. Reforestar prioritariamente las microcuencas Topochica, Tomatal y Tepantlán, en donde existe una gran erosión hídrica y deforestación.
2. Reforestar el corredor fluvial con pantas nativas, para la regulación del caudal natural del río y evitar el aporte de sedimentos por erosión y transporte de sólidos suspendidos, y con ello evitar el azolve del lago.

9.4.1.4.9 Control de Cárcavas

En las subcuencas se han realizado una serie de acciones para controlar las cárcavas, como la construcción de gaviones, con el propósito fundamental de detener el azolve y ser abrevadero para el ganado doméstico y fauna silvestre, además de contribuir a conservar la humedad del suelo. Las mayores superficies de cárcavas en la cuenca se presentan en las microcuencas de Tepantlán, Topochica y el Tomatal que agrupan más del 53.7% de la superficie de cárcavas en la cuenca (Figura 9.4.6).

Medidas de Mitigación:

1. Realizar un estudio integral sobre el transporte de los sedimentos hacia el lago, que incluya medidas correctivas y de manejo de cárcavas, así como la construcción de obras hidráulicas y medidas de control forestal que contribuyan a un mejor manejo de los recursos.
2. Construir represas de piedra, mampostería y elementos de la región como parte de un sistema de bordos, con la finalidad de disminuir el transporte de materiales sólidos que son arrastrados por las barrancas y arroyos y que finalmente causan el azolvamiento del lago.

- Fortalecer los trabajos y acciones en el manejo y control de las cárcavas para evitar el transporte de sedimentos al lago.

PORCENTAJE DE EROSIÓN EN LA MICROCUENCA, DEL TOTAL DE LA EROSIÓN EN LA CUENCA

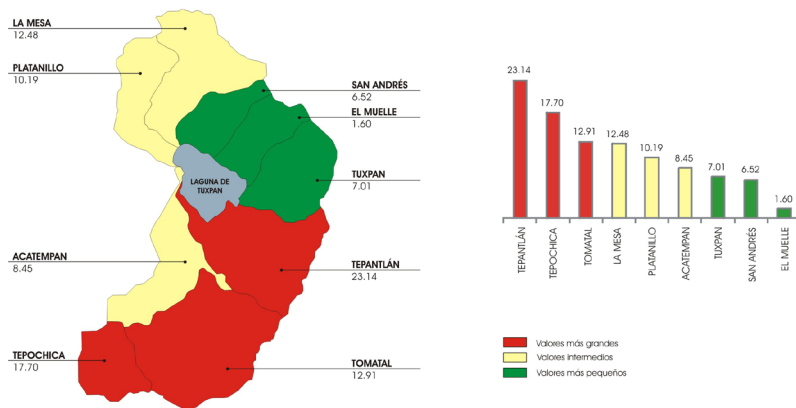


Figura 9.4. 6. Distribución porcentual de las cárcavas en la subcuenca (modificada de IMTA 2013).

9.4.1.4.10 Agroquímicos en la agricultura

En las subcuencas se observa una fuerte dependencia de los fertilizantes para la producción de maíz. Los agricultores opinan que su uso se incrementó debido al bajo rendimiento que se obtiene si no se aplican, y afirman que las plagas se vuelven cada vez más resistentes a los pesticidas aplicados, por lo que se ven en la necesidad de aumentar las dosis. Cambiar los agroquímicos que utilizan por otros nuevos que salen al mercado representa un incremento en costos y una mayor

dependencia de los agroquímicos. En las subcuencas en el 2012 fue la última vez que se contó asistencia técnica por parte del municipio y sólo para el cultivo de maíz.

Otro aspecto importante es la afectación en la salud humana por la manipulación de los agroquímicos al aplicarlos. En entrevista, el comisariado ejidal de la localidad de Tuxpan dijo que se tienen dos casos de intoxicación en la localidad por el uso del Furdán líquido, por no tomar las medidas correspondientes al momento de prepararlo y aplicarlo en campo; como el uso de guantes y cubreboca.

Medidas de Mitigación:

1. Asistencia técnica para el uso y aplicación de fertilizantes.
2. Cambio del uso de agroquímicos menos tóxicos.

9.4.1.4.11 Impacto ambiental en la biodiversidad

La modificación del cauce de los ríos altera al corredor fluvial cambiando la forma natural de los rápidos y las pozas, requeridos por algunos organismos acuáticos de flora y fauna, perdiendo nichos y especies. También altera la velocidad de la corriente reduciendo la diversidad de hábitats para los macroinvertebrados, esenciales en el mantenimiento de la red trófica y propicia la invasión de especies exóticas al reducir las áreas de desove, refugio y crianza de las especies nativas. La introducción de especies exóticas, accidental o intencional, causa cambios en las relaciones ecológicas de depredación e hibridación, e introduce enfermedades en las especies. La presencia en el lago de *Hypostomus* sp. (género de especies exóticas invasoras que habita en aguas pocos profundas), es considerada como “Una de las mayores amenazas para la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos continentales y para las pesquerías de agua dulce” porque ingieren los huevos y/o larvas de especies nativas o introducidas, compitiendo con éstas por el alimento y/o exterminándolas). Las especies introducidas compiten con éxito con las nativas por las zonas de refugio, nutrientes, crianza, ovoposición y espacio, como parece suceder

en el lago. Otro problema debido al cambio en la calidad del agua, es la eventual mortandad de peces y una progresiva disminución en la presencia de aves y reptiles.

Medidas de Mitigación:

1. Estudiar de la composición, estructura y función de la comunidad de peces, así como la relación de *Hypostomus* sp. con las pesquerías, especie exótica sumamente competitiva por los recursos y una de las mayores amenazas para la biodiversidad en los cuerpos de agua superficiales.
2. Implementar el caudal ecológico en el río El Tomatal.
3. Reencausar el río hacia el canal de llamada por los campos del INIFAP, para evitar la llegada de los sedimentos directamente al lago.

9.4.1.4.12 Impactos por la modificación del cauce del río y corredor fluvial

Los corredores fluviales son sistemas complejos que incluyen variedad de corrientes, suelos, plantas y animales que efectúan procesos ecológicos múltiples en los ríos, que van desde la modulación del flujo, el almacenamiento de agua, la remoción de materiales pesados y proveen el hábitat para gran cantidad de plantas y animales acuáticos y terrestres (Arthington 1998).

Las perturbaciones a los corredores fluviales y ecosistemas asociados, son inducidas naturalmente por tormentas, ciclones y huracanes, o por influencia de las actividades humanas, y pueden ocurrir en forma simultánea o por separado. Ya sea en forma simple o combinada, estas perturbaciones generan estrés y tienden a alterar la estructura del corredor fluvial y, con ello, las funciones ecológicas asociadas, como parece ocurrir con el río El Tomatal y la Laguna de Tuxpan.

Las perturbaciones humanas en el río se asocian a la ampliación de las zonas de cultivo y la desviación del cauce natural hacia el lago a principios de los 40's, lo

que generó cambios ecológicos en la estructura y función del corredor fluvial, así como en la frecuencia y magnitud de los caudales en las diferentes áreas del cauce modificado.

La regulación del río mediante represas puede alterar al ecosistema (Lewis 2000). El comportamiento estacional del río puede influir en los cambios de profundidad del lago, en su estratificación térmica y en la distribución de nutrientes en todo el cuerpo de agua, mientras que la degradación de la calidad del agua del río se refleja en la del lago. El cambio del curso natural del río El Tomatal, se asocia al transporte de azolve, como se aprecia en la batimetría del lago, que presenta las profundidades más bajas cerca de la desembocadura.

Si se considera la morfometría y el volumen anual de escurrimientos que ingresan por el río El Tomatal, que transporta aproximadamente 18,700 T al año de azolve, con un volumen de 24'494 m³, la pérdida total de lago se calcula en aproximadamente 127 años, tiempo geológico muy corto considerando que el lago tiene 5,000 años de existencia. Esto repercutirá en la pérdida de hábitats para las diferentes especies de flora y fauna acuáticas, perdiéndose no solo su biodiversidad, sino el medio de subsistencia de la población de Tuxpan.

Medidas de Mitigación:

Las perturbación del cauce y corredor fluvial del río Tomatal, generó efectos concatenados que alteraron el ecosistema y sus alrededores, destacando el aumento de desechos municipales y mayores aportes de azolve, agroquímicos, contaminantes y nutrientes al lago. La estrategia que se sugiere en este caso es:

1. Desviar el río El Tomatal (por la zona del INIFAP), para que la carga de sedimentos ya no azolve más la Laguna de Tuxpan,
2. Reforestar el corredor fluvial, y
3. Analizar la composición, estructura y función de la comunidad de peces del lago para generar las estrategias de manejo, recuperación y conservación del río y del lago.

9.4.1.5 Problemas Prioritarios

El análisis de las condiciones socio-ambientales prevalecientes resultó en la identificación de siete problemas prioritarios que afectan a las subcuencas de Tuxpan y río El Tomatal:

1. Disminución de la calidad del agua;
2. Deterioro de los recursos bosque y suelo;
3. Crecimiento urbano desordenado;
4. Rezagos Sociales y Económicos;
5. Pobreza e insalubridad;
6. Insuficiencia en la investigación y el monitoreo ambiental, y
7. Deficiencias en cultura ambiental, capacitación productiva, comunicación y participación social (Figura 9.4.7).



Figura 9.4.7. Problemas prioritarios en las subcuencas de la Laguna de Tuxpan y El Tomatal (modificada de IMTA 2013).

9.4.1.5.1 Disminución de la calidad del agua en la Laguna

La actividad económica principal de la comunidad de Tuxpan es el turismo. Para atender este sector se cuenta con infraestructura restaurantera, la mayoría localizada en el entorno del lago. Estos establecimientos no cuentan con sistemas de tratamiento de efluentes propios, por lo que sus aguas residuales van directamente a las fosas sépticas o indirectamente al lago.

Por su parte, la agricultura esparcida en las microcuencas de Tuxpan y el Tomatal genera contaminación difusa que, al unirse a las aportaciones puntuales de los desechos urbanos, contaminan en forma continua al lago y alteran el ciclo químico natural del río.

Las alteraciones morfológicas causadas por la desviación del cauce del río, repercuten en la calidad del agua junto con el incremento de sedimentos, pesticidas y fertilizantes de las actividades agrícolas, y la materia orgánica y coliformes fecales de los desechos municipales urbanos, que incrementan directamente la contaminación del lago, correlativamente con los agroquímicos adheridos a los sedimentos que elevan la salinidad del suelo. Además, el lavado de ropa dentro del lago genera contaminación difusa con aportes de nutrientes como N y P, que con el tiempo promueven la eutroficación del cuerpo de agua.

9.4.1.5.2 Deterioro de los recursos bosque y suelo

Las subcuencas presentan pérdida de la cantidad de suelo por la erosión derivada de la deforestación y el inadecuado manejo de bosque, y de su calidad por el cambio en el uso del suelo y prácticas agropecuarias inconvenientes. También presentan reducción en su capacidad de retención e infiltración de agua de lluvia, por efecto de la pérdida de cobertura vegetal y de las alteraciones en las pendientes naturales del suelo y el desplazamiento del ganado.

La explotación inadecuada del bosque para producción de leña, carbón y postes, el sobrepastoreo de los agostaderos por 1,250 cabezas de ganado bovino y 600 de caprino, y la agricultura en suelos con pendiente pronunciada (2 a 20%),

originan la erosión del suelo en alrededor de 2,070 ha (que incluye 177 ha de cárcavas y 392 ha de tepetate), pérdida de productividad de los sistemas agrícopecuarios y azolvamiento del lago, disminuyendo el volumen y la calidad del agua.

9.4.1.5.3 Crecimiento urbano desordenado

La ausencia de un plan regional de desarrollo territorial ha dado como consecuencia una amplia e intensa lotificación en la parte norte del lago, en donde se aprecia una amplia deforestación y un cambio en el uso del suelo de bosque a semi-urbano, lo dificulta el suministro de servicios públicos básicos como el abastecimiento de agua potable y alcantarillado. Por su parte, la invasión de la zona de inundación y el corredor fluvial por construcciones y viviendas tanto en el área rural-urbana de la localidad como en algunas secciones, genera una contaminación alta por las descargas de aguas residuales y desechos sólidos. Según la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, por las características físicas del río, con un ancho promedio de 6.5 m, le corresponde como zona federal una franja de 10 m de ancho en ambas márgenes.

9.4.1.5.4 Rezagos sociales y económicos

Las tarifas de cobro y el sistema de pago no son eficientes para propiciar que el organismo operador Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Iguala (CAPAMI) mejore los servicios. Se requiere fomentar el pago por servicios ambientales y esquemas similares para conservar el medio ambiente. Se requiere ordenar el turismo y fomentar el ecoturismo de la región, así como el uso eficiente del agua en los restaurantes y hoteles que se encuentran en la periferia del lago. Asimismo, se sugiere la introducción de riego tecnificado y alta productividad en las áreas de producción agrícola y frutícola de los huertos en la localidad de Tuxpan.

9.4.1.5.5 Pobreza e insalubridad

Las localidades de la cuenca se encuentran en un nivel de marginación alto a muy alto, y carecen de los servicios básicos de abastecimiento de agua potable y alcantarillado. De 820 viviendas particulares en la localidad de Tuxpan, solo cuarenta cuentan con agua entubada y el resto tienen pozos y la mayoría cuenta con fosas sépticas. Por otra parte, solamente el 42% de las viviendas de la comunidad de Tuxpan cuentan con drenaje.

Esta problemática requiere la implementación de algunas tecnologías básicas para el manejo y tratamiento de las aguas residuales de la subcuenca de Tuxpan, que permitan a los pobladores mejorar sus condiciones de vivienda y calidad de vida.

El uso de tecnologías apropiadas de agua potable y saneamiento básico, acompañadas de programas de educación, mejorarán el bienestar humano elevando las condiciones de vida de aquellos que no logran satisfacer sus necesidades básicas. La tecnología debe ligarse con la cultura y las prácticas cotidianas de manera que se aprenda la relación entre la salud del individuo y el entorno, y de así lograr cambios de comportamiento e inculcar hábitos higiénicos.

9.4.1.5.6 Deficiencias en cultura ambiental, capacitación productiva, comunicación y participación social

En la cuenca no existe una cultura para usar eficientemente el agua y proteger al ambiente de la contaminación de ríos y barrancas, lo que revela la necesidad de implementar programas de comunicación y participación ciudadana permanente y sistemas de vigilancia para que se respete la legislación ambiental vigente.

La recuperación ambiental del lago involucra una etapa de reconocimiento acerca de los beneficios que los seres humanos recibimos de ellos. Es necesario reconocer que los ecosistemas son finitos y que dependen de las acciones que se realicen para preservar los recursos.

La organización social Comité Pro-Defensa de la Laguna y Ecosistema de Tuxpan se encarga de llevar a cabo las acciones relacionadas con la preservación del lago, flora y fauna, evitar la contaminación y realizar la limpieza en su periferia.

Estas acciones no son totalmente compartidas por algunos habitantes de la zona, sobre todo por los que llegan de la ciudad de Iguala los fines de semana, que ensucian la periferia del lago. Por otra parte, las descargas de las comunidades de El Tomatal y Tuxpan exhiben la poca cultura y compromiso ambiental por parte tanto de los responsables del vertido directo del agua contaminada como de las autoridades correspondientes.

El Comité busca la preservación del lago, pero en general no existe una cultura del cuidado del ambiente, demostrando la necesidad de implementar programas de comunicación y participación ciudadana permanente y de sistemas de vigilancia sobre el respeto a la legislación vigente o, en su caso, para que se incluya la conservación del lago en la legislación ambiental del municipio, y se incluya un sistema de seguimiento y evaluación de indicadores ambientales.

Las autoridades del Comité iniciaron una campaña de recomendaciones a los visitantes, donde se les prohíbe la cacería de patos y otras especies, con la finalidad de recuperar lo que se ha perdido en este importante entorno ecológico.

A través de anuncios que han sido colocados en lugares estratégicos, se exhorta a los visitantes a no dejar basura dentro y fuera del lago, con la posibilidad de recibir una multa de hasta mil pesos.

El monitoreo de las variables climáticas y físicas y químicas del agua, suelos, y demás que integran el ecosistema de la cuenca, permiten establecer las bases para realizar un manejo integral para la recuperación ambiental del lago y de las subcuencas El Tomatal y Laguna de Tuxpan. No existe, hasta el momento un programa permanente de vigilancia ambiental del lago, ni un monitoreo científico-técnico histórico de lo que sucede en el lago y en el río. La participación del sector social y productivo en la rehabilitación del cuerpo de agua no es suficiente. Se cuenta con un acervo limitado sobre estudios técnicos para el mejoramiento de las condiciones ambientales y preservación del lago. Estos estudios aislados, si bien ayudan a identificar y cuantificar lo que acontece en las subcuencas, no están integrados a un plan o programa de mejoramiento integral (Cuadro 9.3.2).

Para un adecuado manejo integral de las subcuencas, es recomendable realizar un monitoreo continuo con intervalos periódicos que incluyan la mayor cantidad de variables físico-químicas del agua y otras variables del ecosistema que permitan establecer las variaciones y condiciones a la que son sometidas las subcuencas y el cuerpo de agua. Estas serán herramientas valiosas que ayudarán en la toma de decisiones sobre las acciones a implementar para la restauración del lago “Laguna de Tuxpan”.

En el Cuadro 9.3.2 se enumeran los problemas prioritarios, los objetivos, así como las metas generales y sus acciones asociadas para efectuar la planeación estratégica para lograr el manejo integrado de las subcuencas El Tomatal y la Laguna de Tuxpan, con el propósito de lograr el manejo, conservación y recuperación del lago.

9.5. MATRIZ DE ALTERNATIVAS DE ACCIÓN

La representación matricial permite analizar detalladamente cada proyecto y la información asociada que sirve de insumo en la toma de decisiones. Con base en el diagnóstico ambiental de las subcuencas y lago “Laguna de Tuxpan”, se identificaron los problemas prioritarios así como las estrategias y acciones ligadas a una serie de objetivos y metas generales. Durante el desarrollo del proyecto se determinaron los resultados científicos y técnicos que definen la situación ambiental de la cuenca. Paralelamente, se realizaron consultas y reuniones con representantes de diversas instituciones y organismos no gubernamentales para consensuar, validar y jerarquizar los proyectos específicos que forman parte de la solución a los problemas. La matriz de acción que se presenta, muestra 61 proyectos que se agruparon de acuerdo al problema prioritario que atienden. De igual manera se encuentran asociados a los objetivos, metas y acciones que se persiguen para atenuar el problema prioritario.

En la matriz, cada proyecto cuenta con una serie de columnas con el nombre del proyecto, su prioridad, el objetivo y así como los programas agrupados federales, estatales y municipales, y otras fuentes de financiamiento (fundaciones), que pueden financiar la solución del problema. La última columna debe de mostrar el costo estimado del proyecto en dólares, que en esta publicación han sido omitidos por la variación constante del mismo. Toda esta información se concentró en una matriz con colores codificados que permiten visualizar y diferenciar los proyectos altamente prioritarios de los que no lo son (Cuadro 9.4.3).

Cuadro 9.3.2. estructura básica del plan estratégico para la recuperación ambiental del lago “laguna de Tuxpan” (modificada de imta 2013).

Problemas prioritarios	Objetivo estratégico	Metas generales	Acciones generales
A. Disminución de la calidad del agua en el lago	OE.A.1 Sanear las Subcuencas Laguna de Tuxpan y El Tomatal, integralmente	M.A.1 Eliminar las descargas de agua residual hacia el río El Tomatal.	A.A.1 Establecer programas de control y clausura de descargas clandestinas al río El Tomatal y al lago.
		M.A.2 Construir la red de alcantarillado en las localidades de El Tomatal y Tuxpan.	A.A.2 Construir la red de alcantarillado en las localidades de El Tomatal y Tuxpan.
		M.A.3 Construir la infraestructura para el tratamiento de aguas residuales.	A.A.3 Construir sistemas convencionales de saneamiento de las aguas residuales.
		M.A.4 Aplicar nuevas tecnologías para sanear las aguas residuales, y las que se generan dentro de la Laguna por el lavado de ropa.	A.A.4 Implementar nuevas tecnologías de construcción y operación económicas y mínima dependencia tecnológica, respetuosas del medio ambiente para el saneamiento de las aguas residuales de las subcuencas de El Tomatal y Tuxpan y las que se generan dentro del lago por el lavado de ropa.
		M.A.5 Eliminar la contaminación por desechos y residuos sólidos.	A.A.5 Realizar la limpieza periódica del lago incluyendo el retiro de residuos sólidos de la periferia e interior del mismo. A.A.6 Promover prácticas efectivas de separación, disposición y reciclamiento de la basura en las localidades El Tomatal y Tuxpan. A.A.7 Limpiar las barrancas y controlar tiraderos irregulares (a cielo abierto) en la localidad de Tuxpan. A.A.8 Diseñar y construir un sitio de disposición final de los residuos sólidos.

Problemas prioritarios	Objetivo estratégico	Metas generales	Acciones generales
A. Disminución de la calidad del agua en el lago	OE.A.2 Establecer el equilibrio entre la disponibilidad del recurso y su aprovechamiento productivo.	M.A.6 Evitar la sobreexplotación de fuentes de abastecimiento de agua y eficientar su uso y aprovechamiento.	A.A.9 Construir infraestructura e incrementar la eficiencia en el uso y manejo del recurso agua en los sectores productivos asociados al turismo. A.A.10 Promover el reúso del agua residual tratada
B. Deterioro de los recursos de bosque y suelo	OE.B.1 Reforestar y detener el proceso erosivo en las cuencas de El Tomatal y Tuxpan.	M.B.1 Detener el proceso erosivo de las microcuencas Topochica, Tomatal y Tepantlán, que integran las subcuencas de El Tomatal y Tuxpan. M.B.2 Reforestar e introducir sistemas agroforestales y frutícolas rentables M.B.3 Establecer un programa de prevención y control de incendio en las cuencas.	A.B.1 Estabilizar las cárcavas y laderas en las microcuencas del Tomatal, Topochica y Tepantlán, principalmente. A.B.2. Introducir cercos vivos. A.B.3 Restaurar las microcuencas de Topochica y Tomatal, agroforestalmente A.B.4 Establecer un sistema de prevención y control de incendio en las microcuencas de las subcuencas.
C. Crecimiento urbano desordenado	OE.C.1 Controlar y armonizar el desarrollo rural-urbano de las microcuencas en un marco de sustentabilidad.	M.C.1 Ordenar el desarrollo rural-urbano, ecológico y territorial de las cuencas de El Tomatal y Tuxpan.	A.C.1 Desarrollar y establecer un Plan de Ordenamiento Regional de las localidades de El Tomatal y en especial de la localidad de Tuxpan.
D. Rezagos sociales y económicos	OE.D.1 Fomentar el desarrollo económico y la calidad de servicios y productos asociados con el agua, bosque y el suelo para mejorar el nivel de vida.	M.D.1 Lograr la autosostenibilidad del organismo operador en el municipio de Iguala. M.D.2 Fomentar el desarrollo en equilibrio para la conservación del medio ambiente.	A.D.1 Establecer tarifas y sistemas de cobro y pago apropiados y eficientes en el organismo operador (CAPAMI). A.D.2 Pagar servicios ambientales o esquemas similares.

Problemas prioritarios	Objetivo estratégico	Metas generales	Acciones generales
D. Rezagos sociales y económicos	OE.D.2 Impulsar el desarrollo socioeconómico sustentable en los sectores forestal agrícola, y turístico.	M.D.3 “Impulsar el turismo” y revitalizar el ecoturismo en la región.	A.D.3 Desarrollar áreas para el ecoturismo.
		M.D.4 Mejorar e incrementar la producción agrícola y forestal.	A.D.4 Desarrollar sistemas agroforestales y de producción frutícola.
		M.D.5 Promover y aprovechar programas y fuentes de financiamiento.	A.D.5 Aprovechar los programas federales, estatales y municipales existentes. A.D.6 Promover y aprovechar el uso de mecanismos financieros nacionales e internacionales para soportar el desarrollo y sustentabilidad ambiental de las cuencas de El Tomatal y Tuxpan.
E. Pobreza extrema e insalubridad	OE.E.1 Proveer agua y saneamiento en comunidades marginadas	M.E.1 Alcanzar coberturas de agua potable y saneamiento superiores al 80% y 60% respectivamente en la cuenca de Tuxpan	A.E.1 Desarrollar, transferir y apropiar paquetes tecnológicos en materia de agua.
		M.E.2 Reducir a los estándares internacionales el impacto de las enfermedades hídricas.	A.E.2 Promover e impulsar sistemas y programas apropiados para la potabilización, saneamiento y disposición de los desechos sólidos en condiciones de pobreza extrema. A.E.3 Implementar Programas de mejoramiento y saneamiento de agua en escuelas.
	OE.E.2 Abatir los problemas de desnutrición y dar opciones productivas	M.E.3. Introducir sistemas de producción agrícola para el autoconsumo y la micro-comercialización.	A. E. 4 Implementar Sistemas de riego de baja presión en huertos familiares.

Problemas prioritarios	Objetivo estratégico	Metas generales	Acciones generales
F. Deficiencias en cultura ambiental, capacitación productiva, comunicación y participación social	OE.F.1 Incrementar la cultura ambiental y la participación ciudadana	M.F.1 Desarrollar, promover, difundir planes y programas de desarrollo permanentes apoyados en el aprovechamiento de los recursos naturales.	<p>A.F.1 Promover la participación y comunicación social de los habitantes y visitantes al lago.</p> <p>A.F.2 Implementar programas de educación ambiental para servidores del turismo, especialmente a los restauranteros de la periferia del lago.</p> <p>A.F.3 Implementar programas de aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.</p>
		M.F.2 Respetar la legislación ambiental	<p>A.F.4 Implementar programas de denuncia, seguimiento y rendición de cuentas así como de sanciones en caso de incumplimiento y daño al ambiente y al lago.</p> <p>A.F.5 Aplicación de las leyes y normas oficiales mexicanas relacionadas al ambiente y a los recursos naturales.</p>
		M.F.3 Elaborar la Base de datos de usuarios del lago.	A.F.6 Elaborar el registro, control de usuarios y visitantes que usan el lago para eventos deportivos y pesca.
		M.F.4 Difundir información científica relacionada con la cuenca y el lago.	A.F.7 Generar investigación científica relacionada a la preservación ambiental de la subcuenca y Laguna de Tuxpan.
		M.F.5. Definir la estructura administrativa para el seguimiento de las acciones de preservación del lago.	A.F.8 Diseñar la estructura administrativa y operativa para la ejecución y seguimiento de las acciones de la preservación y manejo de la subcuenca y del lago.

Problemas prioritarios	Objetivo estratégico	Metas generales	Acciones generales
G. Insuficiencias en el monitoreo e investigación ambiental	OE.G.1 Mejorar la calidad y cantidad de la información hidroambiental de la subcuenca y el lago.	M.G.1 Contar con información constante y fiable sobre la calidad del agua superficial y subterránea, así como de la flora y fauna de la subcuenca.	<p>A.G.1 Desarrollar e implementar una red de monitoreo periódico de calidad de agua superficial y subterránea.</p> <p>A.G.2 Implementar programas de seguimiento de indicadores de contaminación en el lago.</p> <p>A.G.3 Preservar la flora y la fauna.</p>
		M.G.2 Elaborar el balance de la disponibilidad hídrica, agroforestal y del recurso suelo.	<p>A.G.4 Determinar el balance de aguas superficiales y subterráneas.</p> <p>A.G.5 Determinar el balance del potencial forestal y el estado actual de la cuenca.</p> <p>A.G.6 Evaluar el comportamiento fluvial en la cuenca.</p>

CUADRO 9.3. 3. Estructura básica del plan estratégico para la recuperación ambiental del lago “Laguna de Tuxpan” (modificada de IMTA 2013).

Acciones Generales	No.	Nombre del proyecto	Objetivo	Programas federales, estatales y municipales y otras fuentes de financiamiento (fundaciones) que pueden contribuir a la solución del problema	Costos
A.A.1 Establecer programas de control y clausura de descargas clandestinas al río El Tomatal y al lago.	1	Identificación, censo y clausura de descargas de agua residual al río El Tomatal y al lago.	Identificar y contabilizar las descargas de agua residual al río El Tomatal y al lago. Incorporar las descargas de agua residual de las localidades de El Tomatal y Tuxpan al sistema de drenaje o a un colector marginal para su posterior tratamiento y evitar el aporte de nutrientes al cuerpo de agua.	APAZU PROSSAPYS	
	2	Proyecto ejecutivo para el diseño de la red de alcantarillado y colectores marginales en la localidad de El Tomatal.	Diseñar la red de alcantarillado de la localidad del Tomatal, incluyendo cálculos, ingeniería básica, planos, topografía y precios unitarios de la obra (Diseño ejecutivo).	APAZU	
		3	Proyecto ejecutivo para el diseño de la red de alcantarillado y colectores marginales en la localidad de Tuxpan.	Diseñar la red de alcantarillado de la localidad de Tuxpan, incluyendo cálculos, ingeniería básica, planos, topografía y precios unitarios de la obra. Diseño ejecutivo.	APAZU
	4	Construcción del sistema de alcantarillado y colectores marginales en la localidad de El Tomatal.	Construir el sistema de alcantarillado y colectores marginales de aguas residuales que se vierten al río, incorporándolas a un sistema de tratamiento para beneficiar a 1,245 habitantes de El Tomatal.	APAZU	
		5	Construcción del sistema de alcantarillado y colectores marginales en la localidad de Tuxpan.	Construir el sistema de alcantarillado y colectores marginales de aguas residuales que se vierten al río, incorporándolas a un sistema de tratamiento para beneficiar a los habitantes de la localidad de Tuxpan.	APAZU
A.A.2 Construir la red de alcantarillado en las localidades de El Tomatal y Tuxpan.	6	PTAR de lodos activados	Construir PTAR para el tratamiento de lodos activados que se generan en la subcuenca.	PROTAR	
	7	Construcción de la PTAR en el CERESO.	Tratar las aguas residuales que se generan en el Centro.	PROTAR	

Acciones Generales	No.	Nombre del proyecto	Objetivo	Programas federales, estatales y municipales y otras fuentes de financiamiento (fundaciones) que pueden contribuir a la solución del problema	Costos
A.A.4 Implementar nuevas tecnologías económicas respetuosas del ambiente, de bajo costo de operación y mínima dependencia tecnológica para el saneamiento de las aguas residuales de las subcuencas de El Tomatal y Tuxpan y las que se generan dentro del lago por el Lavado de ropa.	8	BIOFILTRO (Biotrop®) para 696 habitantes en el poblado de Tuxpan.	Implementar y poner en marcha un sistema de tratamiento de aguas residuales BIOFILTRO (Biotrop®) para beneficiar a 696 habitantes del poblado de Tuxpan.	PROSSAPYS	
	9	BIOFILTRO (Biotrop®) para 570 habitantes en el poblado de Tuxpan.	Implementar y poner en marcha un sistema de tratamiento de aguas residuales BIOFILTRO (Biotrop®) para beneficiar a 570 habitantes del poblado de Tuxpan.	PROSSAPYS	
	10	BIOFILTRO (Biotrop®) para 366 habitantes en el poblado de Tuxpan.	Implementar y poner en marcha un sistema de tratamiento de aguas residuales BIOFILTRO (Biotrop®) para beneficiar a 366 habitantes del poblado de Tuxpan.	PROSSAPYS	
	11	BIOSISTEC® BIOS-TAR-IMTA.	Implementar el sistema BIOSISTEC® BIOSTAR-IMTA para el tratamiento de aguas residuales.	PROSSAPYS	
	12	Diseño y construcción de ECOLAVADEROS en el poblado de Tuxpan.	Diseñar y construir ECOLAVADEROS para el poblado de Tuxpan (6 módulos con 12 lavaderos cada uno).	PROSSAPYS	
	13	BIOFILTRO (Biotrop®) chico en el poblado de El Tomatal	Implementación del sistema de tratamiento de aguas residuales BIOFILTRO (Biotrop®) chico en el poblado de El Tomatal.	PROSSAPYS	
	14	BIOFILTRO (Biotrop®) mediano en el poblado de El Tomatal.	Implementación del sistema de tratamiento de aguas residuales BIOFILTRO (Biotrop®) mediano en el poblado de El Tomatal.	PROSSAPYS	
	15	BIOFILTRO (Biotrop®) grande en el poblado de El Tomatal.	Implementación del sistema de tratamiento de aguas residuales BIOFILTRO (Biotrop®) grande en el poblado de El Tomatal.	PROSSAPYS	

Acciones Generales	No.	Nombre del proyecto	Objetivo	Programas federales, estatales y municipales y otras fuentes de financiamiento (fundaciones) que pueden contribuir a la solución del problema	Costos
A.A.5 Limpiar periódicamente los residuos sólidos del lago incluyendo su interior y la periferia.	16	Programa de limpieza en la Laguna.	Limpiar la periferia del lago con la participación de la sociedad, instituciones de los tres niveles de gobierno y del sector educativo, para mejorar y conservar el aspecto visual de la misma.	PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS. COMITÉ PRO-DEFENSA DE LA LAGUNA Y ECOSISTEMA DE TUXPAN.	
A.A.6 Promover prácticas efectivas de separación, disposición, reciclamiento de basura en las localidades de El Tomatal y Tuxpan.	17	Separación, recolección, transporte y disposición final de los residuos sólidos de la subcuenca.	Separar, coleccionar, reusar, transportar y disponer finalmente los residuos sólidos recuperables de las viviendas y restaurantes periféricos al lago.	PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS. AGENDA GRIS.	
A.A.7 Limpiar barrancas y controlar los tiraderos a cielo abierto irregulares en la localidad de Tuxpan.	18	Desazolve y limpieza del río El Tomatal.	Evitar inundaciones dando mantenimiento preventivo al cauce del río. Evitar la acumulación de la basura en algunos puntos del cauce mediante el Programa de limpieza de cauces.	COMITÉ PRO-DEFENSA DE LA LAGUNA Y ECOSISTEMA DE TUXPAN. CONSEJO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN DEL EDO. DE GRO.	
	19	Programa de limpieza de barrancas.	Limpiar gran cantidad de residuos sólidos de las barrancas de la cuenca que son arrastrados hacia el lago en época de lluvias.	AGENDA GRIS. COMITÉ PRO-DEFENSA DE LA LAGUNA Y ECOSISTEMA DE TUXPAN	

Acciones Generales	No.	Nombre del proyecto	Objetivo	Programas federales, estatales y municipales y otras fuentes de financiamiento (fundaciones) que pueden contribuir a la solución del problema	Costos
A.A.8 Diseñar y construir un sitio para la disposición final de los residuos sólidos.	20	Proyecto ejecutivo para la reubicación del tiradero a cielo abierto en la localidad de Tuxpan.	Reubicar el basurero que se encuentra en la localidad de Tuxpan y establecer un nuevo sitio empleando las técnicas más avanzadas de impermeabilización para evitar la contaminación del acuífero por medio de lixiviados.	PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS	
	21	Construcción de un sitio para la disposición final de residuos sólidos.	Construir el sitio para la disposición final de los residuos sólidos de la subcuenca de Tuxpan.	PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS	
A.A.9 Incrementar la cobertura y eficiencia de la distribución de agua potable.	22	Proyecto ejecutivo para construir y ampliar la red de distribución de agua potable en la localidad de El Tomatal.	Realizar el proyecto y diseño ejecutivo de la red de abastecimiento de agua de la localidad de El Tomatal, incluyendo cálculos, ingeniería básica, planos, topografía y precios unitarios de la obra.	APAZU PROSSAPYS	
	23	Proyecto ejecutivo para construir y ampliar la red de distribución de agua potable en la localidad de Tuxpan.	Realizar el proyecto y diseño ejecutivo de la red de abastecimiento de agua de la localidad de Tuxpan, incluyendo cálculos, ingeniería básica, planos, topografía y precios unitarios de la obra.	APAZU PROSSAPYS	
	24	Red de abastecimiento de agua potable en la localidad de El Tomatal.	Beneficiar a una población de 1,245 habitantes de El Tomatal que no tiene servicio de agua potable.	APAZU PROSSAPYS	
	25	Red de abastecimiento de agua potable en la localidad de Tuxpan.	Beneficiar a una población de 2,530 habitantes y 780 viviendas en Tuxpan que no tienen el servicio de agua potable y que corresponde al 96 % de las viviendas sin este servicio.	APAZU PROSSAPYS	
A.A.10 Promover el reúso del agua residual tratada.	26	Reúso de agua residual tratada.	Promover el reúso del agua residual tratada aplicando tecnologías no convencionales respetuosas del ambiente para regar jardines en viviendas, restaurantes y áreas verdes que se encuentren cercanas al lago.	APAZU PROSSAPYS	

Acciones Generales	No.	Nombre del proyecto	Objetivo	Programas federales, estatales y municipales y otras fuentes de financiamiento (fundaciones) que pueden contribuir a la solución del problema	Costos
A.B.1 Estabilizar cárcavas y laderas en las microcuencas de El Tomatal, Topochica y Tepantlán, principalmente.	27	Riesgos hidrológicos en la cuenca de Tuxpan	Identificar mediante cartografía y trabajo de campo zonas o viviendas ubicadas en puntos de riesgo o invadiendo la zona federal, con el fin de reducir pérdidas humanas ante fenómenos meteorológicos extremos, como lluvias torrenciales y huracanes.	PROGRAMA FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA	
	28	Control de la producción de sedimentos en la subcuenca Laguna de Tuxpan con obras adecuadas en cauces y cárcavas.	Diseñar y construir presas de gaviones en cauces pequeños y cárcavas para regular los escurrimientos superficiales, controlar la producción de sedimentos e inducir la infiltración y la recarga de acuíferos en la subcuenca de la Laguna de Tuxpan.	PRONAFOR PROCODES	
A.B.2. Introducir cercos vivos	29	Proyecto para establecer cercos vivos en parcelas de las microcuencas de El Tomatal y Tuxpan.	Establecer cercos vivos en parcelas para controlar la erosión y favorecer la recarga subterránea de las microcuencas de El Tomatal y Tuxpan.	PRONAFOR PROCODES	
A.B.3 Restaurar agroforestalmente las microcuencas Topochica y Tomatal.	30	Reproducción de especies vegetales nativas de las subcuencas.	Producción de plantas nativas para la recuperación de la cubierta forestal de la selva baja y selva media de las cuencas de El Tomatal y Tuxpan.	PRONAFOR	
	31	Reforestación de las subcuencas Laguna de Tuxpan y río El Tomatal para controlar los escurrimientos y procesos erosivos.	Diseñar e implantar un programa intenso y sostenido de reforestación en general y del bosque en particular, así como la aplicación de prácticas y obras conservacionistas para regular los escurrimientos superficiales, inducir la infiltración y la recarga de acuíferos, controlar la erosión que propicia sedimentos, mejorar la capacidad biológica de los suelos y favorecer la cantidad y calidad de las aguas en la subcuenca Laguna de Tuxpan, Gro.	PRONAFOR PROCODES	
A.B.3 Restaurar agroforestalmente las microcuencas Topochica y Tomatal.	32	Programa para la sustitución de agroquímicos por abonos verdes.	Sustituir agroquímicos por abonos verdes e incrementar la fertilidad de suelos agrícolas en las microcuencas de El Tomatal y Tepantlán.	PRONAFOR	

Acciones Generales	No.	Nombre del proyecto	Objetivo	Programas federales, estatales y municipales y otras fuentes de financiamiento (fundaciones) que pueden contribuir a la solución del problema	Costos
A.B.4 Establecer un sistema de prevención y control de incendio en las microcuencas de la Subcuenca.	33	Programa de protección forestal para la prevención y combate de incendios.	Determinar el proceso metodológico para tomar acciones en caso de siniestro en la zona boscosa de la cuenca.	PRONAFOR PROCODES PROGRAMA ESTATAL PARA LA PREVENCIÓN Y COM BATE DE INCENDIOS FORESTALES	
A.C.1 Desarrollar y establecer un Plan para el Ordenamiento Regional de las localidades de El Tomatal y en especial de la localidad de Tuxpan.	34	Elaboración del Plan de Ordenamiento Ecológico Territorial y Regional del municipio de Iguala.	Participar en la propuesta y gestión del Plan de Ordenamiento Ecológico Territorial del Municipio de Iguala.	PRONAFOR PROCODES	
	35	Regulación de la lotificación de los predios que se encuentran en la parte noreste del lago.	Capacitación ejidal y municipal sobre los procedimientos y autorización de los nuevos desarrollos habitacionales, y venta de predios en la parte norte del lago.	PRONAFOR	
A.D.1 Establecer tarifas y sistemas de cobro y pago apropiados y eficientes en el organismo operador de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Iguala (CA-PAMI).	36	Establecimiento de esquemas tarifarios.	Ajustar las tarifas para lograr la sustentabilidad financiera del organismo operador.	PROSSAPYS	
A.D.2 Pago de servicios ambientales o esquemas similares.	37	Esquema de pago del servicio ambiental por la limpieza de cauces en la zona federal y cuerpos de agua.	Incluir el cobro por servicios ambientales para apoyar la conservación de las fuentes de producción de agua para beneficiar a toda la población de la subcuenca de Tuxpan.	PROSSAPYS	

Acciones Generales	No.	Nombre del proyecto	Objetivo	Programas federales, estatales y municipales y otras fuentes de financiamiento (fundaciones) que pueden contribuir a la solución del problema	Costos
A.D.3. Desarrollar áreas ecoturísticas.	38	Proyecto ecoturístico, de esparcimiento, cultura y recreación en el lago y subcuenca de Tuxpan.	Elaborar el proyecto de factibilidad para practicar motocross en la parte alta de la cuenca de El Tomatal y paracaidismo en las canchas del fútbol de la Laguna de Tuxpan.	PROCODES	
A.D.4 Aprovechar los programas federales, estatales y municipales existentes.	39	Programas federales, estatales y municipales.	Capacitar para aprovechar los programas federalizados aplicables al saneamiento y abastecimiento del agua y alcantarillado. Además de aquellos con un enfoque social para mejorar las condiciones sociales de la comunidad de El Tomatal y Tuxpan.	PROGRAMA DE DIFUSIÓN Y DIVULGACIÓN DE ACTIVIDADES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS DEL EDO. DE GRO.	
A.D.5. Promover y aprovechar los mecanismos financieros nacionales e internacionales para soportar el desarrollo ambiental sustentable de las subcuencas de El Tomatal y Tuxpan.	40	Gestión de recursos de las fuentes de financiamiento. Congresos federales y estatales.	Captar recursos adicionales y contar con líneas de financiamiento de los tres órdenes de gobierno, instituciones internacionales y fundaciones que apoyan el manejo y distribución del agua.	COMITÉ PRO-DEFENSA DE LA LAGUNA Y ECOSISTEMA DE TUXPAN.	
A.E.1. Desarrollar, transferir y adaptar paquetes tecnológicos en materia de agua.	41	Paquetes ecotecnológicos para las comunidades altamente marginadas de la subcuenca.	Diseñar una campaña de información que facilite la apropiación de paquetes ecotecnológicos en las comunidades más marginadas de la subcuenca. Mejorar el acceso al agua y los servicios de saneamiento básico.	PROSSAPYS FUNDACIÓN GONZALO RIO ARRONTE.	
	42	Estudio de la factibilidad de captar agua de lluvia en las localidades de El Tomatal y Tuxpan.	Estudiar la factibilidad de captar, almacenar y distribuir agua de lluvia en las localidades de Tuxpan y El Tomatal.	PROSSAPYS PROCODES FUNDACIÓN GONZALO RIO ARRONTE	

Acciones Generales	No.	Nombre del proyecto	Objetivo	Programas federales, estatales y municipales y otras fuentes de financiamiento (fundaciones) que pueden contribuir a la solución del problema	Costos
A.E.2. Promover e impulsar sistemas y programas, apropiados a condiciones de pobreza extrema, de potabilización y saneamiento del agua y disponer los desechos sólidos.	43	Campaña de comunicación integral sobre los beneficios de usar letrinas secas ecológicas y construir las en asentamientos de las márgenes del río El Tomatal.	Beneficiar a los habitantes de 100 viviendas sobre las márgenes del río El Tomatal	FUNDACIÓN GONZALO RIO ARRONTE	
A.E.2. Promover e impulsar sistemas y programas, apropiados a condiciones de pobreza extrema, de potabilización y saneamiento del agua y disponer los desechos sólidos.	44	Programas de educación ambiental en las escuelas.	Diseñar un programa escolar de educación ambiental con transferencia de paquetes tecnológicos apropiados para el uso, manejo y aprovechamiento del agua y desechos sólidos en las escuelas.	PROGRAMA AGUA LIMPIA. -PROGRAMA DE EDUCACIÓN AMBIENTAL Y CULTURA ECOLÓGICA.	
	45	Programa permanente de educación y cultura ambiental para los habitantes de la cuenca.	Sensibilizar sobre los problemas ambientales de la Laguna de Tuxpan y divulgar las acciones para la participación activa de la sociedad.	PRONAFOR PROCODES	
A.F.1 Promover la participación y comunicación social de los habitantes y visitantes al lago.	46	Plan estratégico de comunicación.	Elaborar un plan estratégico de comunicación y utilizar los medios de comunicación masiva (radio, prensa y televisión) para difundir los materiales para la educación ambiental enfocada al lago. Difusión de la preservación de la subcuenca y Laguna de Tuxpan.	PROGRAMA DE DIFUSIÓN Y DIVULGACIÓN DE LAS ACTIVIDADES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS DEL EDO. DE GRO.	
	47	Programa para fortalecer los comités ciudadanos de vigilancia.	Programa para fortalecer los comités ciudadanos de vigilancia, con asistencia técnica y capacitación de la PROFEPA y SEMARNAT entre otras.	PRONAFOR	

Acciones Generales	No.	Nombre del proyecto	Objetivo	Programas federales, estatales y municipales y otras fuentes de financiamiento (fundaciones) que pueden contribuir a la solución del problema	Costos
A.F.2 Implementar programas de educación ambiental para los servicios turísticos, en especial para los asentados de la periferia del lago.	48	Programa permanente de educación y cultura ambiental para servidores del turismo.	Sensibilizar sobre los problemas ambientales del lago y divulgar las acciones para la participación activa de la población dedicada al turismo.	PROCOCODES PROGRAMA GUERRERO VERDE	
A.F.3 Implementar programas de denuncia, seguimiento y rendición de cuentas así como de sanciones en caso de incumplimiento y daño al ambiente y el lago	49	Registro de las estadísticas de los ilícitos recurrentes en la Laguna de Tuxpan.	Contar con una base de datos de los ilícitos acontecidos en el lago.	COMITÉ PRO-DEFENSA DE LA LAGUNA Y ECOSISTEMA DE TUXPAN	
	50	Programa de inspección, vigilancia y sanción de conductas ambientales prohibidas en el lago.	Capacitar mediante talleres de legislación ambiental, técnicas y estrategias de acción, y seguimiento de procesos administrativos, para realizar acciones de inspección y vigilancia con la participación de PROFEPA, CONAGUA y ONGS. Reglamentar las sanciones por actos contra el medio ambiente en la cuenca y en el lago.	COMITÉ PRO-DEFENSA DE LA LAGUNA Y ECOSISTEMA DE TUXPAN.	
A.F.4 Aplicar las leyes y normas oficiales mexicanas relacionadas al ambiente y a los recursos naturales.	51	Fortalecimiento del Comité de vigilancia del lago	Prevenir y controlar la generación de residuos sólidos y la protección a la flora y fauna, así como atender denuncias ambientales.	PRONAFOR. PROGRAMA ESTATAL DE VIDA SILVESTRE.	
A.F.5 Llevar el registro y control de usuarios y visitantes en eventos deportivos y pesca en el lago.	52	Registro de los usuarios que realizan actividades dentro y en la periferia del lago.	Elaborar una base de datos de los usuarios que desarrollan alguna actividad dentro y en la periferia del lago. Número y tipo de naves acuáticas que se encuentran en el lago.	COMITÉ PRO-DEFENSA DE LA LAGUNA Y ECOSISTEMA DE TUXPAN.	
A.F.6 Realizar investigación científica para la preservación de la subcuenca y Laguna de Tuxpan.	53	Sistema de Información Geográfica de la subcuenca de Tuxpan.	Integrar un sistema de información geográfico y bases de datos para el manejo de la información de las subcuencas de El Tomatal y Tuxpan.	PRONAFOR. PROGRAMA FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA.	

Acciones Generales	No.	Nombre del proyecto	Objetivo	Programas federales, estatales y municipales y otras fuentes de financiamiento (fundaciones) que pueden contribuir a la solución del problema	Costos
A.F.7 Diseñar la estructura administrativa y operativa para ejecutar y dar seguimiento a las acciones de preservación y manejo de la subcuenca y de la Laguna de Tuxpan.	54	Integración de un consejo administrativo que de seguimiento a las acciones para la preservación del lago.	Integrar un consejo administrativo para dar seguimiento a las acciones para preservar el lago. Formalizar los convenios de colaboración y participación entre diferentes instituciones federales, estatales, municipales, públicas y privadas, que favorezcan los objetivos de manejo de la Laguna de Tuxpan.	PRONAFOR. PROCODES.	
A.G.1 Desarrollar e implementar una red de monitoreo periódico de la calidad de agua superficial y subterránea.	55	Red de monitoreo ambiental de la calidad del agua superficial y subterránea.	Seguimiento de la variabilidad de la calidad de agua superficial y subterránea de la Laguna.	PROGRAMA FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA	
A.G.2 Implementar programas de seguimiento de indicadores de contaminación en el lago.	56	Limnología semestral de la laguna de Tuxpan, Gro.	Seguimiento de los indicadores de eutrofización	PROGRAMA FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA	
A.G.3 Preservación de flora y fauna	57	Peces del lago La Laguna de Tuxpan.	Evaluación de las especies de peces del lago para la generación de estrategias de manejo de la actividad pesquera.	PROGRAMA DE PRO DUCTIVIDAD Y COM PETITIVIDAD AGRO ALIMENTARIA. AGENDA AZUL	
A.G.4 Determinar los balances de agua superficial y subterránea.	58	Evaluación el balance hídrico de la subcuenca y Laguna de Tuxpan.	Conocer el comportamiento hidrológico de la subcuenca y el lago.	PRONAFOR. AGENDA AZUL.	
	59	Censo de pozos, piezometría, nivelación y pruebas de bombeo para establecer el balance hídrico subterráneo.	Realizar el seguimiento del comportamiento geohidrológico de la subcuenca y de los niveles piezométricos del acuífero y su modelación.	CONAGUA	

Acciones Generales	No.	Nombre del proyecto	Objetivo	Programas federales, estatales y municipales y otras fuentes de financiamiento (fundaciones) que pueden contribuir a la solución del problema	Costos
A.G.5 Determinar el balance entre el estado forestal actual y el potencial en la subcuenca.	60	Estudio para evaluar el potencial forestal actual y los escenarios futuros para tomar medidas de preservación.	Conocer el estado de los recursos forestales y analizar su variación con la finalidad de preservar el ecosistema.	PRONAFOR. PROCODES. PROGRAMA GUERRERO VERDE	
A.G.6 Evaluar el comportamiento fluvial en la subcuenca	61	Estudio de Factibilidad hidráulica fluvial del canal de conexión entre el río El Tomatal y el Canal de llamada de la Laguna de Tuxpan.	Determinar la factibilidad del canal de conexión entre el río Tomatal con el Canal de llamada de la Laguna de Tuxpan.	PROGRAMA GUERRERO VERDE. PRONAFOR. PROGRAMA FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA	

9.5 DISCUSIÓN

Para lograr el enfoque holístico, se consideró a la subcuenca como la unidad funcional o sistema abierto, complejo, dinámico y espacialmente heterogéneo, dentro del cual se delimitan unidades ambientalmente homogéneas (subcuencas, microcuencas), mediante la caracterización integral de los componentes naturales del medio biofísico, acorde con la metodología utilizada en otras subcuencas (vg. Cotler, 2007). Por lo tanto, la delimitación de la subcuenca estuvo dada por la organización de los cauces, considerando tanto el área drenada por la corriente fluvial (río El Tomatal) y sus tributarios, como a los demás componentes que se definieron mediante el relieve (cambios de altitud). Para generar el plan estratégico de manejo de las subcuencas y al agua se le consideró como un elemento controlador de la dinámica funcional del ecosistema y del desarrollo económico y social de las comunidades en forma coincidente con Mass (2007).

Dentro de estas unidades territoriales ambientalmente homogéneas (subcuencas y micro cuencas), tienen mucha importancia los aspectos altitudinales porque definen cambios en la precipitación y en la temperatura, así como en las formas del relieve y los suelos, en los tipos de rocas y materiales superficiales, en los cambios en la riqueza y abundancia de la biota, en los usos del suelo, en los sistemas productivos y su potencial de productividad, así como en la organización social y política para el manejo de los recursos. Estos cambios se incorporaron al plan estratégico para el manejo integrado (gestión, o manejo ordenado y coherente) del territorio de las subcuencas, considerando la visión holística del sistema geohidrológico, definido en sus fronteras por el parteaguas, el agua, los bosques, los suelos, la biodiversidad y los ecosistemas, así como la infraestructura y los servicios que el hombre ha creado para satisfacer sus necesidades de trabajo, habitación, transporte, sustento y recreación.

Es importante resaltar que los beneficios que ofrecen los bosques a nivel local, regional y, en algunos casos, mundial, derivan de su valor como estabilizadores del suelo frente a los procesos erosivos, como fuente de abastecimiento de

agua y como centros de biodiversidad, origen de diversos productos madereros y no madereros, y lugar de recreación. Los bosques se han asociado con diversos servicios ambientales a nivel de cuenca hidrológica, como son la regulación de los flujos de agua, la conservación de la calidad del agua, el control de la erosión y sedimentación, la reducción de la salinización del suelo, la regulación del nivel freático y la conservación de hábitats acuáticos, (Cotler 2007). Por lo tanto, es importante establecer la relación bosque-agua como base para la generación de programas de manejo por pago de servicios ambientales que promuevan la conservación de la zona boscosa, sobre todo la localizada en las zonas montañosas, caracterizada por su fragilidad geocológica y por los altos índices de marginación de sus habitantes. El pago por servicios ambientales es un mecanismo estratégico para el desarrollo sostenible, ya que al instrumentarlos se pretende asegurar la conservación de procesos naturales que benefician a los seres humanos (García-Coll et al, 2007).

El plan estratégico expuesto propone el manejo integral (holístico) de las cuencas del río El Tomatal y lago “Laguna de Tuxpan”, para mantener el equilibrio en los sistemas ecológicos y un nivel de calidad ambiental aceptable, como causa y consecuencia de la cantidad y calidad del agua de las subcuencas, acorde con Caire (2007). Asimismo, genera una herramienta útil para que los tomadores de decisiones puedan regular las acciones ya sean individuales o colectivas, de empresas u organizaciones sociales, para lograr el manejo, conservación y recuperación de los cuerpos de agua superficiales, de los bosques, los suelos, la fauna y los ecosistemas asociados dentro del estado y el municipio, orientando su desarrollo con múltiples acciones y actores que interactúan en la cuenca dándole razón y sentido a los procesos de gestión.

9.6. CONCLUSIONES

El Plan Estratégico para la Recuperación Ambiental de las subcuencas El Tomatal y “Laguna de Tuxpan”, Gro., se generó a partir del interés político por la conservación y recuperación del lago, así como de los resultados del diagnóstico ambiental (biofísico). Posteriormente se procedió a, la identificación de los problemas socioambientales prioritarios en la cuenca y en el lago, así como de sus causas y efectos que los caracterizan, tanto cualitativa como cuantitativamente.

Para resolver los problemas prioritarios, se estableció una serie de objetivos y estrategias, a partir de las cuales se identificaron acciones generales y se propusieron proyectos específicos, que fueron jerarquizados tomando en cuenta su impacto para la restauración y preservación de las subcuencas. Este ejercicio se acompañó de las fuentes de financiamiento posibles, específicamente de los programas federales actualizados, los programas estatales y municipales, así como otras posibles fuentes de recursos financieros.

Finalmente, la información se concentra en una matriz que facilita el seguimiento de los proyectos, su prioridad, objetivos, y las posibles fuentes de financiamiento para la realización de los proyectos asociados a la solución de los problemas prioritarios que se presentan en las subcuencas.

El plan estratégico es un proceso que proporciona elementos básicos y suficientes para la planificación ambiental integral a nivel de subcuencas y lago. Los resultados del Plan Estratégico se agruparon en 61 proyectos, ordenados de acuerdo a la problemática que se presenta en las subcuencas.

9.7 REFERENCIAS

- ARTHINGTON, A.H. 1998. *Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: Review of Holistic Methodologies*. Occasional Paper No. 26/98. Land and Water Resources Research and Development Corporation: Canberra, Australia.
- BOJÓRQUEZ, L.A. 1989. "Methodology for Prediction of Ecological Impacts Under Real Conditions in Mexico". *Environmental Management*, 13, pp. 545-551.
- BOJÓRQUEZ-TAPIA, L.A., S. SÁNCHEZ-COLÓN & A. FLORES (2005). "Building consensus in environmental impact assessment through multicriteria modeling and sensitivity analysis". *Environmental Management* 36(3): 469-481.
- CAIRE, G. 2007. Retos para la gestión ambiental de la cuenca Lerma Chapala: Obstáculos institucionales para la introducción del manejo integral de cuencas. En: Cottler, H. (Ed.), *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp.195 – 211. México.
- CAMPBELL, N.S., D'ARCY, B.J., FROST, C.A., NOVOTNY, V. Y A.L. SANSOM, 2006. *Diffuse Pollution. An introduction to the problems and solutions*. IWA Publishing. UK.
- CASILLAS, G.J.A. 2007. El programa nacional de microcuencas: una estrategia de desarrollo integral. En: Cottler, H. (Ed.), *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp. 259-275. México.
- COTTLER, H. y A. PRIEGO. 2007. El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: El caso de la cuenca Lerma-Chapala. En: Cottler, H. (Ed.), *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp. 59- 64. México.
- CLOQUELL-BALLESTER, V.A., R. MONTERDE-DÍAZ, V.A. CLOQUELL-BALLESTER & M.C. SANTAMARINA-SIURANA 2007. "Systematic comparative and sensitivity analyses of additive and outranking techniques for supporting impact significance assessments". *Environmental Impact Assessment Review* 27: 62-83.
- DOUROJANNI, A. C. 2007. Si sabemos tanto sobre qué hacer en materia de Gestión Integrada del Agua y Cuencas ¿Por qué no lo podemos Hacer? En: Cottler, H. (Ed.), *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp. 149- 183. México.
- GARCÍA COLL, I., A. AVELINO, M., A. RAMÍREZ, A. NIÑO, C., A.J. RIVAS y L. DOMÍNGUEZ. 2007. La relación agua-bosque: delimitación de zonas prioritarias par pago de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca del río Gavilanes, Coatepec, Veracruz. En: Cottler, H. (Ed.), *El manejo integral de cuencas en México*. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp.59- 64. México.

- GONZÁLEZ-MATEOS, R; VOLKE-HALLER, V; GONZÁLEZ-RÍOS, J; OCAMPO-POTRILLO, M; ORTIZ-SOLORIO, C., Y MANZO-RAMOS, F. 2007.** Efecto de la erosión del suelo sobre el rendimiento de maíz de temporal. *Tierra Latinoamericana* 25(4):399-408.
- LEWIS, W.M. 2000.** Temperature, heat, and mixing in Lake Valencia, Venezuela. *Limnol. Oceanogr.*, 28: 273-286.
- IMTA, 2007.** *Plan Estratégico para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Río Apatlaco.* Coordinación de Hidráulica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- IMTA, 2009.** *Plan de la Recuperación Ambiental de la Laguna de Bojórquez.* Coordinación de Hidráulica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. 2013.** *Estudio para la Identificación de las Causas Niveles y Grado de Contaminación Ambiental en la Laguna de Tuxpan, Guerrero y Propuestas para el Tratamiento de las Aguas Residuales Descargadas en Ella y sus Afluentes.* IMTA-CAPASEG. Informe Final. Tomo II. Convenio CCE.01.04.3.0.2013.-0231. México.
- MASS, M. y H. COTTLER. 2007.** El protocolo para el manejo del ecosistema en cuencas hidrográficas. En: Cottler, H. (Ed.), *El manejo integral de cuencas en México.* Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp. 21-40. México.
- TOMASINI-ORTIZ, A. C.; MOELLER-CHÁVEZ, G.; SÁNCHEZ-CHÁVEZ, J. J., Y BRAVO-INCLÁN, L. A. 2012a.** Cianobacterias y Cianotoxinas en el Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica.* 5(2):93-101. <http://www.journal.unam/index.php/aidis/index>.
- TOMASINI-ORTIZ, A. C., MOELLER-CHÁVEZ, G. E., SÁNCHEZ-CHÁVEZ, J. J., Y BRAVO-INCLÁN, L. A. 2012b.** Cianobacterias y cianotoxinas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. ATL. *El portal del agua desde México.* Julio, Núm. 37. <http://atl.org.mx>.
- VALENCIA V.J.C., J.J. DÍAZ N., L. VARGAS M. 2007.** La gestión integrada de los recursos hídricos en México: un nuevo paradigma en el manejo del agua. En: Cottler, H. (Ed.), *El manejo integral de cuencas en México.* Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, pp.213 – 258. México.



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA



INVESTIGACIÓN