



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

INSTITUTO DE BIOLOGIA

**EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA
DEL LAGO DE TECOCOMULCO, ESTADO DE
HIDALGO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

(BIOLOGIA AMBIENTAL)

P R E S E N T A

BIOL. SANDRA DEL ROSARIO BERISTAIN MANTEROLA

DIRECTORA DE TESIS: DRA. GUADALUPE DE LA LANZA ESPINO

MÉXICO, D. F.

FEBRERO 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RECONOCIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca de maestría otorgada.

Al Instituto de Biología (UNAM) , en particular a la Oficina de Posgrado y al apoyo recibido por el Dr. Fausto R. Méndez de la Cruz.

A mi comité tutorial, Dra. Guadalupe de la Lanza Espino, Dr. Eberto Novelo Maldonado y a la M. en C. Elizabeth Flores Ramírez; por sus aportaciones y revisiones al trabajo realizado.

A DIOS

**Por estar conmigo y mi familia en todo momento y por que me ha permitido
llegar hasta donde estoy**



A MI FAMILIA



**Por su amor, apoyo y comprensión en todos los aspectos de mi vida,
principalmente a mi madre por su paciencia conmigo y a mi padre que desde
donde esta siempre me ayuda y protege, a los dos gracias por darme la
principal arma para defenderme en esta vida que es la educación y el
aprendizaje constante.**



**A mis hermanas, hermanos y sus respectivas familias y a mi sobrinita
querida Nallely.**

Por estar siempre juntos



**Al amor de mi vida, a ti que de alguna manera me motivas a mejorar día con
día**

**y que espero algún día estemos juntos por siempre,
y si no que nuestras vidas estén llenas de paz, amor y felicidad.**



A mis mascotas queridas: popy, friskie, boby[†] y chillon[†]

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a través del Instituto de Biología por su albergue y apoyo en todos los sentidos y por contar con el equipo para poder llevar a cabo este gran paso de mi vida.

Es un orgullo para mí haber pertenecido a la máxima casa de estudios.

A la Dra. Guadalupe de la Lanza Espino, por su apoyo para la realización de este trabajo y por acogerme bajo su tutoría.

Al Dr. Eberto Novelo Maldonado, por sus atenciones y revisiones a este documento y por su paciencia y comprensión.

A la M. en C. Elizabeth Flores Ramírez por su apoyo a la revisión de este trabajo y también por aguantarme y tenerme paciencia.

Al M. en C. José Luis García Calderón y al Dr. Luis Zambrano González, por ser parte del jurado de mi examen de grado y por las revisiones realizadas a la tesis.

A la Dra. Georgina Fernández Villa Gómez, del Posgrado de Ingeniería de la UNAM, por su apoyo durante la realización del trabajo experimental de la tesis y por su amistad.

A la Biol. Alma Y. Pérez Mendoza, por su amistad y apoyo en la realización de la medición de metales pesados en el laboratorio del Posgrado de Ingeniería de la UNAM.

Al Biol. Enrique Ortiz Bermúdez, por su ayuda en la realización del mapa del lago y por su apoyo constante en todos los aspectos de mi vida y por la gran amistad que llevamos.

A la Dra. Gloria Vilaclara Fatjó, por sus explicaciones otorgadas.

A mis amigas y amigos: Verónica, Abdón, Miguel, Carlos, David, Lorena, Fabiola, Rocío, Leticia, Nancy, Miguel, Thomas, Rubén, Eladio, Martín, Eduardo, Ligia, Lidio y Dr. Lauro. Gracias por su amistad.

CONTENIDO

	Paginas
➤ Resumen	i - ii
➤ Introducción	1 - 8
➤ Objetivos	9
➤ Zona de estudio	9 - 23
➤ Metodología	23 - 26
➤ Resultados	27 - 40
➤ Discusión	41 - 48
➤ Conclusión	49
➤ Bibliografía	50 - 57

Resumen

El Lago de Tecocomulco es considerado un relicto del que fue el gran interés sistema lacustre de la Cuenca de México. Su importancia ecológica esta dada por su vegetación acuática y terrestre y por las aves migratorias que ahí anidan. Su valor económico se debe al potencial productivo que posee tanto pesquero, forestal y agrícola así como ecoturístico.

El Lago de Tecocomulco pertenece a la subcuenca del mismo nombre, ubicado al sureste del Estado de Hidalgo, entre los 19°50'00" y 19°74'00" norte y 98°21'00" y 98°26'00" oeste a una altitud de 2,514.3 msnm; su forma es irregular alargada con 10.5 km de longitud y entre 1 y 3.5 km de ancho, cuenta con una superficie de aproximadamente 17.69 km² y guarda un volumen de 6.1 millones de m³.

La calidad del agua del lago se encuentra en deterioro por diversos factores, entre los que se encuentra la alta densidad de vegetación acuática principalmente del tular de *Schoenoplectus californicus*, cuya cobertura representa el 19% del área del lago, impidiendo una buena circulación del agua aunado al mal manejo que le dan los pescadores. Así como por la alta deforestación en la zona provocada por las prácticas ganaderas, la expansión de las tierras de cultivo que en su mayoría son de temporal y por el abandono de las tierras donde antes se cultivaba el maguey pulquero y que han provocado un alto grado de erosión y azolvamiento del lago.

En este estudio se evaluó la calidad fisicoquímica del agua en época de estiaje y de lluvias en el año 2002. Los resultados mostraron un lago con temperaturas bajas de 8.5°C en el mes más frío a 27.7°C en el mes mas cálido. Por su nivel de profundidad es somero, tanto en la época de secas como en la de lluvias; con una escasa visibilidad al disco de Sechi derivada del gran aporte de sedimentos, provocando a su vez severas condiciones de anoxia en el mes de mayor precipitación y promovida por la roza, tumba y quema del tular, el cual a su vez propició un aumento de la carga orgánica reflejada en los niveles de DQO alcanzados. Los valores de dureza pertenecen a un cuerpo de agua dulce hasta moderadamente dura; con un pH que va de neutro a alcalino dependiente de la temporalidad y con una alta conductividad en el mes más cálido. En cuanto a la variación de nutrimentos se observaron altas concentraciones de nitrógeno total y de nitratos, influenciados por las actividades antropogénicas tales como: la descarga de aguas residuales y el uso de fertilizantes en los cultivos agrícolas. En tanto que los niveles de fósforo y de ortofosfatos registrados lo clasifican como un ambiente mesotrófico, pero que puede tender a la eutrofia si no se hace algo para desviar los drenajes de aguas negras provenientes de los poblados cercanos al lago.

Los metales traza aun no muestran influencia por descargas industriales, pero que será necesario contemplar y realizar monitoreos de estos elementos a fin de que su situación no se vea incrementada, por las necesidades de desarrollo socioeconómico imperantes en la zona.

Abstract

The Tecocomulco Lake is the only remaining natural body water that belongs to the basin of Mexico. It has an ecological importance due to its aquatic and terrestrial vegetation and migratory birds. It has a productive potential for fishery, forestry and agriculture.

It lies in a sub-basin named the same and is located to the south east in the State of Hidalgo, between 19°50'00" - 19°74'00" N and 98°21'00" - 98°26'00" W, at 2,514.3 m above sea level. It has an elliptic shape with 10.5 Km long and 1 to 3.5 Km wide; the surface of the lake can reach up to 17.69 km², with a volume of 6.1 mM³.

The quality of the water is worsening due to anthropogenic and natural factors such as: high density of aquatic macrophytes, mainly Bulrushes of *Schoenoplectus californicus*, covering the 19% of the lake surface and preventing the flow of water. Fishermen mishandling this situation is another factor besides the vast destruction of the forest owing to the change in the use of the land by temporal agricultural. These are the two most important factors that are causing the erosion and obstruction of this lake.

This study evaluated the physicochemical parameters of the water in the rainy and drought seasons during the year 2002. The results showed that the lake was 8.5°C in the coldest month but it was 27.7°C in the hottest month. The lake is shallow and its depth is not altered by seasons. The Secchi disk visibility is low because of the load of sediments causing anoxic condition especially in the rainy season encouraged by the slash-and-burn of bulrushes by fishermen, resulting in the increase of organic load shown in the DQO levels. Hardness levels belong to a body of fresh water up to slightly hard water with a neutral-to-alkaline pH depending on the transient nature and with high conductivity in the warmest season. Regarding the nutrients variation high portions of total nitrogen and nitrates were observed, influenced by anthropogenic activities such as: sewage and the use of fertilizers in the harvesting fields. Registered phosphorus and Orthophosphates levels rate it as a mesotrophic environment, which might lead to eutrophic state if sewage from nearby towns is not deviated.

Trace metals have not proved to be altered by industrial sewage which will have to be observed and monitored them to determine whether they increase as a result of the socioeconomical development in the area.

INTRODUCCIÓN

México cuenta con una variedad de ecosistemas acuáticos de gran importancia, por su elevada diversidad de especies, tanto de plantas como de animales. Sin embargo éstos se encuentran sujetos a diversas presiones por parte del hombre como la contaminación doméstica e industrial y en la introducción de especies exóticas que ponen en riesgo a las endémicas.

México posee 320 cuencas hidrográficas en las cuales se destacan 70 lagos con superficies que varían entre las 10 a 100 Km². La disparidad entre estos cuerpos de agua es significativa pues mientras existen 14,000 reservorios de los cuales 83.5 % tienen una superficie menor a 0.1 Km², los embalses mayores de 100 Km² cubren el 66% de la superficie inundada (De la Lanza Espino y García Calderón, 2002).

En México se tiene reconocidos 70 lagos, los más grandes están sobre los terrenos accidentados del Sistema Volcánico Transversal (S.T.V), siendo su origen variado, contando con los de origen tectónico que corresponden a los mas antiguos como el de Chapala, Cuitzeo y Pátzcuaro, los de origen volcánico explosivo que son muy profundos pero no muy extensos como los Lagos de Alchichica, Aljojuca y Quechulac (Banderas, 1994). Para la Cuenca de México existieron una cadena de lagos los de Chalco, Xochimilco, Texcoco, Xaltocan y Zumpango, además de estos lagos también existieron otros cuerpos de agua en la parte noreste de la Cuenca de México: Apan, Tochac y Tecocomulco, dos de ellos han desaparecido Apan y Tochac (o Atocha), permaneciendo el Lago de Tecocomulco, que se conserva como un cuerpo de agua perenne. Algunos autores han considerado a este lago como el único cuerpo de agua natural que todavía sobrevive dentro de la cuenca de México (Fig. 1) y que representa un relictos de lo que fueron en el pasado los ecosistemas lacustres de esta zona. Algunos estudios del lago han determinado su gran importancia, como relictos ecológico al ser un hábitat que guarda una variedad de especies en la flora fanerogámica acuática (Lot y Novelo, 1978), conformada por 21 familias y 36 especies, siendo el tular *Schoenoplectus californicus* (C.A. Mey.) Soják, la especie de mayor cobertura en el lago, que según Ruiz (2000) y Gutiérrez et al. (2002) es del 80%. En la ficoflora se han registrado más de 122 especies distribuidas en cuatro divisiones, las cuales son de gran importancia como organismos bioindicadores de las condiciones de los lagos y su funcionalidad en la conservación de la calidad del agua así como en la productividad biológica del lago (Lot,1995). Los estudios faunísticos, han hecho referencia a los ciliados epibiontes y a otros tipos de invertebrados que muestran gran importancia en la interacción con las condiciones fisicoquímicas del cuerpo de agua (Aladro; 2000). La herpetofauna esta conformada por anuros como la *Rana montezumae* (Rodríguez, 1989) y la ictiofauna deriva de la introducción y cultivo de diferentes especies de carpas (Chávez,1981), tales

como: la carpa barrigona, herbívora, carasio o dorada, israel o espejo, negra, plateada y brema (Gutiérrez et al., 2002). Siendo la mayoría de los estudios referidos a la avifauna cuyo número de especies es de 120 y que comprenden tanto a aves residentes permanentes, como a residentes de invierno, transitorias y algunas de ellas están declaradas en la NOM-ECOL-059 en riesgo. El lago es considerado un Área de Importancia de Conservación de Aves (AICA), establecido así por: la UNAM, el IPN, la CONABIO, la SEMARNAT de Hidalgo; y la Sociedad Mexicana de Ornitología A.C (Jiménez, 2001). Además de que algunas de las especies vegetales y animales son endémicas de la región y que perduran como vestigios de lo que fue anteriormente la cuenca de México (Espinosa, 1996).

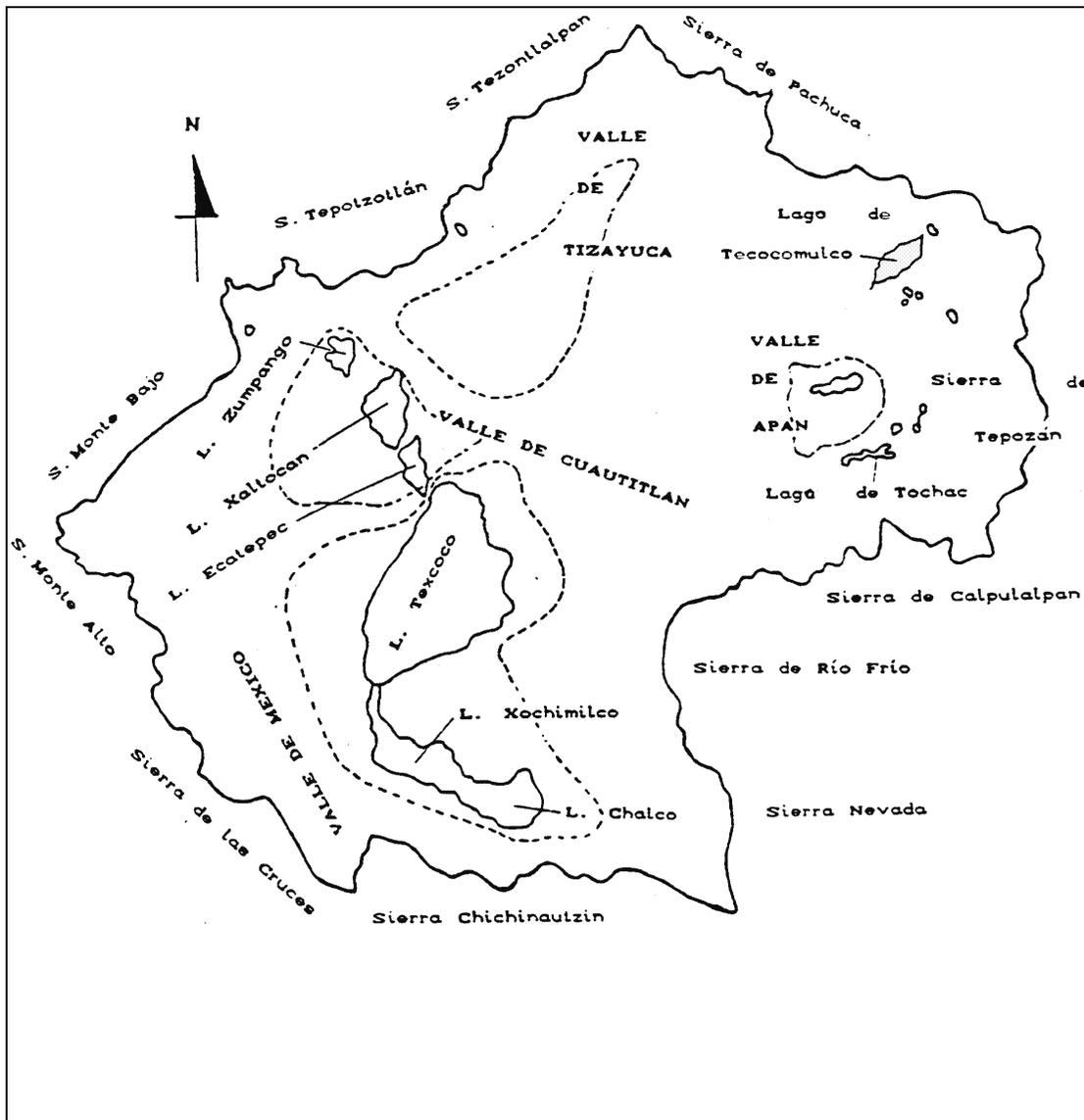


Fig. 1.- Mapa en el que se muestra la cuenca de México con los lagos que la conformaban (modificado de Jiménez y Juárez, 2000)

Además de la diversidad florística y faunística del lago que representa su valor ecológico, está su importancia social y económica, ya que en este cuerpo de agua se encuentran municipios y comunidades aledañas dedicadas a actividades agropecuarias como la pesca y la agricultura. Los municipios en los cuales se encuentra inmerso el lago y del cual reciben sus beneficios son: Tepeapulco, Cuautepec y Apan (INEGI, 2002). La pesca es realizada por dos organizaciones de pescadores : SSS PP San Miguel y SSS PP Tecocomulco, conformadas por 39 pescadores, esta actividad requiere ser mejorada y fortalecida junto con otros tipos de cultivos como el del ajolote, de la rana, del pescado blanco y del charal. Además de capacitar a los pescadores para un mejor aprovechamiento del recurso de forma sustentable y redituable (Gutiérrez et al., 2002). En cuanto a la agricultura los cultivos principales son: el maíz de grano, cebada de grano, frijol, avena forrajera, trigo de grano, avena de grano, haba de grano, alfalfa verde, pastos y pastizales, maguey pulquero y nopal (INEGI, 1995 a y b).

Sin embargo el lago de Tecocomulco ha sido perturbado por una serie de factores naturales y antropogénicos (Caballero, et al., 1999). Estudios de la subcuenca de Tecocomulco muestran los problemas que afectan no solo las reservas y la calidad del agua subterránea sino también el agua superficial, tales como: la intensa deforestación, la alta erosión de los suelos y la infiltración directa al suelo de los drenajes de las comunidades aledañas contaminando el agua subterránea de la zona con altos contenidos de *Escherichia coli* y *Enterobacter* que están por encima de lo permisible y cuyas concentraciones varían de un sitio a otro, definiendo un agua relacionada con sistemas de flujo subterráneos de este a oeste muy dinámicos y poco profundos (Huizar et al., 2001).

Los problemas del Lago de Tecocomulco

Según Ruiz (2000) los problemas de Tecocomulco se deben a diversos factores: el lago se encuentra dentro de una subcuenca del mismo nombre, que es endorreica y la mayor parte de la red hidrológica de la zona vierte sus aguas al lago, provocando un intenso asolvamiento debido a la fuerte erosión del suelo, ya que los sedimentos transportados poco a poco van reduciendo las dimensiones del vaso lacustre y con ello mermando la capacidad de almacenamiento del agua. El autor ha calculado que la pérdida anual de suelo en la subcuenca es de 24,121 ton al año, lo cual implicaría que en un máximo de 18 años el lago quedaría azolvado por completo. Lo anterior también es provocado por el arrastre de partículas de las zonas agrícolas, ya que la agricultura al ser de temporal deja el suelo en la mayor parte del tiempo al descubierto y expuesto al viento. También la deforestación en la parte media y alta de la cuenca ha contribuido a este problema. Otra manera en que las actividades agrícolas han influido en la disminución del área lacustre, es a

través de la construcción de una serie de canales que controlan el curso del agua de los torrentes para evitar con ello que se inunde la parte baja de los terrenos y en otros casos para retener por más tiempo el agua y ser usada en el riego.

Los antecedentes de esta problemática radican en asuntos de índole socio políticos como sucedió con la producción de pulque que hasta hace 10 años fue la actividad económica más importante de esta zona y hoy día persiste sólo a nivel familiar, su decadencia la ocasionaron las acciones socio-políticas (el combate contra el consumo de esta bebida en las ciudades cercanas) que afectaron a las zonas productoras de esta bebida y provocaron el abandono de esta actividad, lo cual promovió la erosión del suelo debido a la masiva desaparición de superficies de magueyes para ocuparlas en la agricultura (Huizar et al., 2001).

También se ha propiciado el incremento del área agrícola por la deforestación, ya que el recurso forestal es explotado por la necesidad de contar con energéticos para las actividades domésticas y de índole económico comercializando la madera tal es el caso del aserradero de Piedra Ancha que anualmente comercia la madera de 10,000 árboles /año (Huizar et al., 2001). Siendo la extracción forestal maderable mayor en el municipio de Cuautepec de 18, 437 m³ y de 3,822 m³ en Tepeapulco (INEGI,1995 a y b).

Actualmente queda poco de la vegetación original ya que según la SAG (1976), la zona en la que se encuentra el lago poseía una superficie forestal de 72.3%, dentro de los cuales un 29% correspondiente a bosques, selvas mediana y baja, un 26% de zonas forestales con otros usos como: agropecuarios, sitios no arbolados y pendientes mayores de 15%; y un 18% de matorrales y áreas de desmonte. En la actualidad y tal como la imagen de satélite del 2000 proporcionada por el INEGI de Pachuca, muestra que el área que circunda al lago está transformada en pastizal cultivado, agricultura de riego, agricultura de temporal con cultivos anuales y asentamientos humanos. Acevedo (1996) considera que tanto la agricultura y las zonas de pastizales que cubren casi el 50% de la superficie del Estado de Hidalgo son las principales causas de degradación de los suelos ya que han acelerado la erosión tanto hídrica como eólica; la salinización; la compactación; la cementación; los encostramientos, la disminución de la materia orgánica y la acidez del suelo; los cuales han repercutido y propiciado junto con otros factores el deterioro de los cuerpos de agua, cuenca abajo y en este caso se ha visto en la disminución de la extensión del lago de Tecocomulco. Este tipo de problemas también han sido mencionados por Ruiz (2000).

Otros de los aspectos por considerar dentro de los problemas del Lago de Tecocomulco residen en las características hidrológicas de la región ya que aunque ésta cuenta con cauces principales:

Cuautlaco, Sarabia, Toronjil y Tepozán, que drenan las partes más activas de la zona; prácticamente toda el agua que en época de lluvias fluye por estos ríos desemboca en la planicie que forma el lago de Tecocomulco inundando además las áreas agrícolas (Huízar et al., 1997). Sin embargo, esta alimentación al lago se ha visto afectada debido a que los lugareños han construido canales para drenar sus parcelas y evitar que éstas sean inundadas, así como también por la construcción de diques artificiales, bordes y canales de desagüe destinados a la extracción de agua por bombeo, con el objeto de ganar terrenos para la actividad agrícola, lo cual ha favorecido y promovido el rápido asolvamiento del cuerpo de agua, que en época de lluvias y por el escurrimiento aportan una gran cantidad de sedimentos que llegan en forma directa hasta el lago (Gutiérrez et al., 2002). Aunado a lo anterior están las formas de uso que la población local hace del agua de manantiales, norias y algunos pozos, con los que explotan el agua para exportarla a Tepeapulco y a otras localidades ubicadas fuera del área de estudio como es el caso de Ciudad Sahagún y Singuilucan (Huízar et al., 2001). El lago era más extenso que en la actualidad, pero en los años de 1952 a 1953, el gobierno construyó el canal de Tultengo, para drenarlo por el lado sur, y éste de alguna manera lo desecó artificialmente (Gutiérrez et al., 2002), esto mismo fue expuesto en 1956 por Arellano y Rojas citado por Espinosa (1996), quienes escribían:

...Todavía en años recientes el lago era muy extenso y de profundidad no despreciable. Sin embargo ahora solo quedan restos de aquel gran deposito. Pues el gobierno durante el periodo comprendido entre el primero de julio de 1952 al 30 de junio de 1953 mando construir la ampliación de un canal de drenaje en el lado sur, de manera que ya se ha ido secando artificialmente, lográndose con esto la aparición de nuevas tierras para el cultivo.....

La expansión de tierras para actividades agropecuarias, asentamientos humanos e industrias establecidas en la cuenca (de diversas ramas), son una fuente de descarga y generadores de residuos peligrosos para la cuenca y sus alrededores (SEMARNAP, 1997). Lo cual el INEGI, 1994 y 1995, manifestó ya que el sector primario dejó de ser una de las actividades principales debido a que el porcentaje de población ocupada en el sector estaba por debajo del 21%, menor al comparado con los demás sectores productivos que ocupaban mas del 35%, lo cual se debe según Hernández (2003) en el caso de Cuautepec a que la actividad pecuaria ha disminuido por la introducción de ganado importado, así como por el bajo nivel de las organizaciones de los productores, como también por la escasa tecnificación utilizada para la crianza y la engorda de estas especies, situación que coloca a los municipios en gran desventaja competitiva y comparativa con los grandes centros productores del país. Siendo la porcicultura según Mejía (1986) una actividad de gran importancia en los tres municipios que rodean al lago, pero que requiere un buen manejo para evitar la expansión de la contaminación de los cuerpos de agua.

Aunado a lo anterior está la propuesta de establecer el nuevo aeropuerto de la ciudad de México en Hidalgo, lo cual tal y como lo menciona el INE se traducirá en una gran demanda de agua y el gobierno estatal de Hidalgo tendría que importar agua de las zonas de Actopan, Tecocomulco y Apan, lo cual pondrá en riesgo los ecosistemas de esas zonas (INE, 2001: <http://www.ine.gob.mx/indexaero.html>).

También la vegetación acuática del lago representa un problema ya que el tule o junco *Schoenoplectus californicus* ocupa un área extensa creando conflictos entre los conservacionistas y los que pretenden un lago para la recreación (Van Ness et al., 2002). En general una vegetación densa de macrofitas es deseable desde el punto de vista de la conservación ya que esto permite la abundancia de aves y de la biodiversidad (Scheffer, 1998). Además ayuda a reducir la turbidez de lagos someros (Hasler y Jones, 1949), a través de servir como una protección contra la erosión en zonas de litoral (Rangel, 1995). En caso contrario y según lo expuesto por Rangel (1995) y Burton (1997), las hierbas acuáticas usan más agua en la evapotranspiración, comparada con la que se pierde por evaporación en un área equivalente de agua abierta. Por otro lado está el papel de las macrofitas en la creación de riesgos importantes en la salud pública, ya que en ellas habitan diversos insectos transmisores de enfermedades (Rangel, 1995). En cuanto a su uso como forraje para el ganado su importancia es discutible, dado que estas plantas tienen un potencial de absorción de compuestos tóxicos muy altos por lo que son ampliamente usadas como organismos indicadores o biomonitores de la calidad del agua (Samecka y Kempers, 2001). En el caso de Tecocomulco la situación del tule contribuye a mermar la calidad del agua del lago ya que los pescadores al abrir caminos para el paso de las lanchas o para la instalación de sus redes de captura de peces, han segado el tule sin cosecharlo y dejando que se pudra en el sitio. Otro de los problemas causados por el tule es la disminución de manera acelerada de los flujos y retención de partículas en suspensión tal y como lo establece Rangel (1995), lo cual promueve el azolvamiento que repercute en la reducción de volúmenes almacenados y por ende en la conducción y abasto de agua.

Según los estudios de geofísica del lugar realizados por Alatríste (1999), la subcuenca donde yace el lago posee un relleno volcánico-sedimentario con un volumen de 500 km^3 y una porosidad entre un 10 y 25%, con un volumen de agua subterránea de 50 y 125 km^3 , que comparada con las de Chalco la cual oscila entre los 2 y 5 km^3 y las de Apan y Tochac de 30 y 75 km^3 , permiten ver la importancia de la infiltración en la subcuenca de Tecocomulco, por lo que otro de los problemas que enfrenta el lago es la infiltración de agua de los drenajes de las poblaciones adyacentes; las cuales

se infiltran directamente en el suelo constituyendo un potencial contaminante para el agua subterránea.

Progresos hacia la rehabilitación del Lago de Tecocomulco

En particular el Lago de Tecocomulco ha sido objeto de estudio por parte de universidades, organizaciones sociales, gubernamentales e instituciones internacionales como RAMSAR. Al respecto el Consejo Estatal de Ecología del Estado de Hidalgo (2001) llevó a cabo el ordenamiento ecológico territorial, escala 1:250000, que contempla al lago dentro de la unidad de gestión ambiental (UGA) XXXII, considerándolo fundamentalmente como un relicto ecológico en la cuenca del valle de México, localizada en los municipios de Tepeapulco y Cuauhtepac y con una diversidad de usos de suelo basados en criterios ecológicos que recomiendan una serie de límites y restricciones para las actividades productivas que se pueden implementar en la zona.

La Unión internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) por sus siglas en inglés , International Union for Conservation of Nature, en su primera convención sobre humedales de importancia internacional, especialmente como hábitat de aves acuáticas, mejor conocida como Convención Ramsar, junto con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) han reconocido como Área Natural Protegida (ANP) y Humedal de Importancia Internacional al lago de Tecocomulco, desde 1993 (Fig. 2). El reconocimiento esta sustentado por los criterios mas importante que la RAMSAR establece para determinar un área como humedal de importancia internacional (Muñoz, 2003 y CONAP, 2003).

Los criterios establecidos por RAMSAR fueron:

- Criterio 1.- El lago es considerado como el último humedal relicto del antiguo sistema lacustre que predominó en toda la Cuenca del Valle de México, en que se refugian y habitan peces, anfibios y aves acuáticas características de lo que fueron los lagos de Anáhuac. Se comporta como un vaso regulador para recarga de acuíferos de la región.
- Criterio 2.- El lago alberga una rica biodiversidad y una gran cantidad de hábitats; algunas especies están sujetas a protección especial como: Ajolote *Ambystoma mexicanus*, y la Rana *Montezumae*; en peligro de extinción está el Pato real, *Cairina moschata*; y bajo la categoría de amenazada está el Pato mexicano, *Anas diazi*.

- Criterio 4: Su importancia estriba en ser un lugar de nidificación, reproducción y paso de gran cantidad de especies de aves acuáticas y terrestres, encontrando más de una decena de aves migratorias provenientes del norte de México, Estados Unidos y Canadá.

Sin embargo ninguna de estas estrategias gubernamentales e internacionales tendrá valor si no se garantiza la cantidad de agua del lago anualmente para mantener un nivel aceptable en su volumen de almacenamiento. Lo anterior implicaría el promulgar una ley para la justa distribución entre los estados usuarios de la subcuenca (Tlaxcala, Puebla e Hidalgo). Es necesario llegar al nivel de ley para que haya respeto por parte de los estados usuarios.

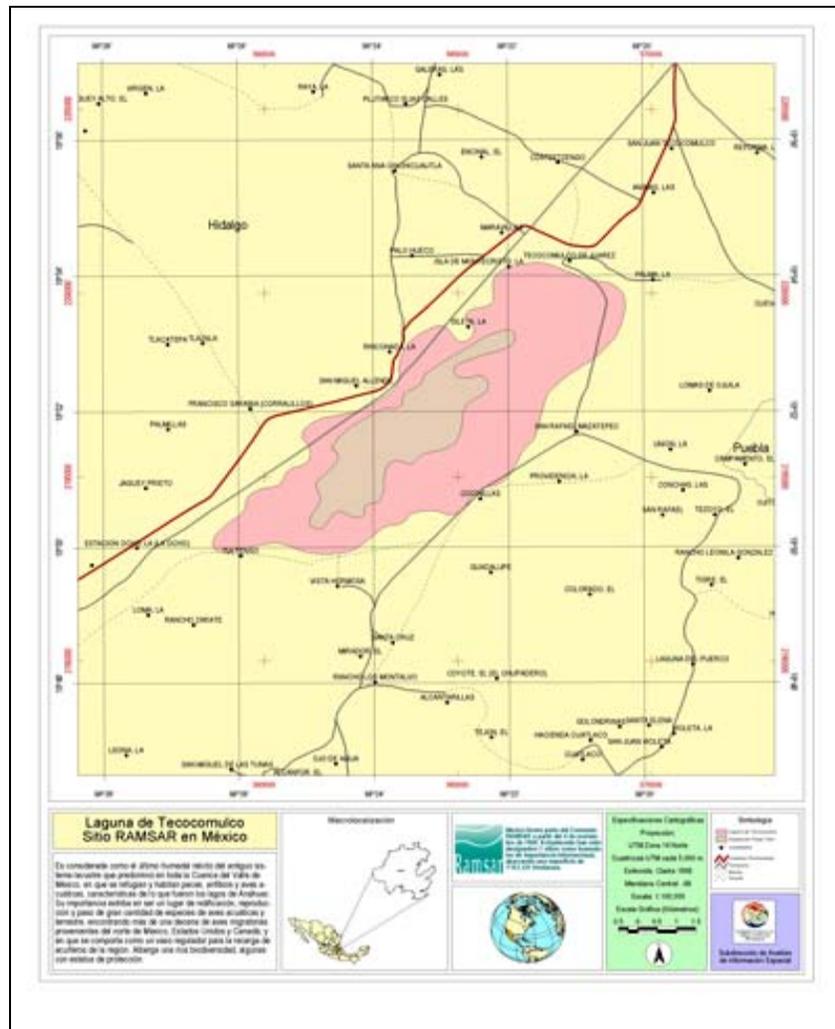


Fig. 2.- Mapa que delimita al lago de Tecocomuclo como ANP, establecida por Ramsar y Conap.

(Fuente: Conanp, 2003)

OBJETIVOS:

Evaluar la fisicoquímica del agua del lago de Tecocomulco y sus posibles implicaciones del medio circundante.

Específicos

- Determinar el comportamiento fisicoquímico del agua del lago a través de la evaluación de los parámetros: profundidad, temperatura, visibilidad, conductividad, oxígeno disuelto, pH, sólidos totales disueltos, nitrógeno total, amonio, nitritos, nitratos, fósforo total, ortofosfatos, demanda química de oxígeno (DQO), dureza, alcalinidad
- Determinar la concentración de metales pesados: Cu, Fe, Zn, Pb, Cd, Ni y Cr, en agua y de Cd, Cr, Cu, Ni y Pb en sedimento.
- Analizar las interrelaciones de los parámetros fisicoquímicos y sus posibles implicaciones en la calidad del agua y de la biota del lago.
- Analizar las implicaciones de las fuentes puntuales y no puntuales en el comportamiento fisicoquímico del agua del lago.

ZONA DE ESTUDIO

Ubicación geográfica

La zona de estudio se encuentra en la parte noreste de la cuenca de México, limitada por las coordenadas 19°42' 13.7" y 19°58'27.4" de latitud norte y 98°11'46.2" y 98°30'1.7" de longitud oeste. Políticamente se encuentra entre los estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala. Es una de las 11 subcuencas en que se divide la cuenca de México (SRH, 1972): Apan, Chalco, Churubusco, Ciudad de México, Cuautitlán, Pachuca, Tecocomulco, Teotihuacan, Texcoco, Tochac y Xochimilco. La superficie de la subcuenca de Tecocomulco es de 536.57 km² y representa el 5.59% del área de la Cuenca de México. Políticamente se encuentra entre los estados de Hidalgo (cinco municipios), Puebla y Tlaxcala (Ruiz, 2000).

Dentro de la subcuenca se encuentra el lago de Tecocomulco, al sureste del estado de Hidalgo, en la cuenca hidrológica del mismo nombre, entre los 19° 50'00" y 19° 74'00" norte y 98° 21'00" y 98° 26'00" oeste y a una altitud de 2,250 msnm. Queda comprendida entre dos regiones de integración

territorial: al norte con la región II Tulancingo; con la parte sur en el Municipio de Cuauhtepac; y dentro de la región XI Apan, con el municipio de Tepeapulco. El lago se localiza a 17 km al noreste de Ciudad Sahagún en la confluencia de los municipios de Tepeapulco, Cuauhtepac y Apan (Gutiérrez et al., 2002) (Fig. 3).

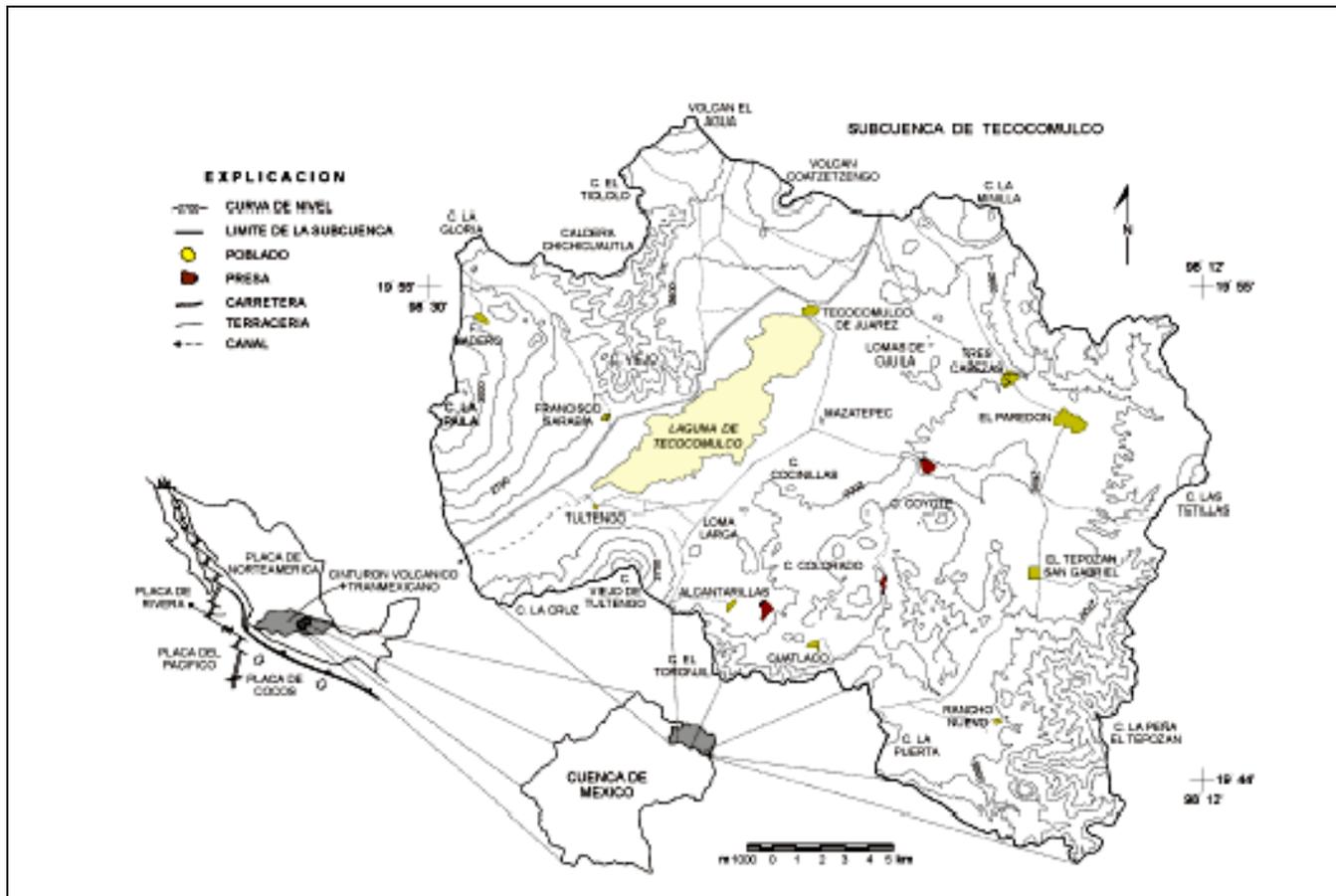


Fig. 3- Localización de la subcuenca y del lago de Tecocomulco (Tomado de Huizar et al., 2001)

El lago tiene forma alargada, orientada de noroeste a suroeste con 8.5 km de largo y 3.6 km en su parte más ancha y su capacidad máxima es de 6,099,912 m³, inundando un área de 17.69 km² (Gutiérrez et al., 2002). Se halla a una altitud de 2,514.3 msnm, está delimitado hacia el norte y el este, por los cerros que corresponden a las estribaciones de la Sierra del Norte del Estado de Puebla; al sur y suroeste por los cerros de Carlota, Xihuingo, San Miguel y otros más, que sirven igualmente de límite de las cuencas vecinas de Tlanalapa y Apan. Sus aguas provienen de manantiales de la cañada de Alcantarillas, cuyos cauces cubren una longitud de 2 km; además son alimentadas por los ríos Coatlaco, Toronjil y Tepozán, de los cuales prácticamente fluye toda el agua en época de humedad (Jiménez, 2001). Existen otras corrientes de menor importancia que bajan de los cerros Viejo de Tultengo, Viejo de la Palma y Volcán Coatzetzingo (Jiménez y Juárez,

1996). Durante la época de secas, solo los ríos Cuatlaco y la parte alta del río Tepozán conducen agua por lo que el embalse es severamente afectado por la temporalidad (Jiménez y Juárez, 2000). Las inundaciones en el área circundante del lago ocurren en el periodo de lluvias (julio-septiembre), que abarcan una superficie de 14.99 km² aproximadamente. El área máxima después de lluvias intensas alcanza 55 km², mientras que la mínima es de 28 km² (Gutiérrez et al., 2002). La demarcación de la zona federal del vaso del lago esta señalada por la curva de nivel de 2, 514.3 msnm, fuera de esta curva se delimita la zona federal de 10 m, a pesar de que la superficie máxima cubierta original ascendía aproximadamente a 17.69km². La profundidad promedio es de 1.50 m y su profundidad máxima es de 2.50 m en el centro de la misma; durante las lluvias suele alcanzar los 3 m, ya que el nivel del agua sube con rapidez, pero desciende en poco tiempo debido a la salida de las aguas por el canal de Tultengo. En temporadas de extrema sequía el lago tiende a secarse, por lo que suele quedar como un pantano con una profundidad media de 0.80 m, el volumen de agua promedio anual de la cuenca es de 2, 718.24 Mm³ con gasto promedio de 1,028 m³ por segundo (Gutiérrez et al., 2002).

Clima

En términos generales el clima de la región es templado subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura media anual que va de 12 a 18°C, la temperatura media del mes más frío oscila entre los -3 y 18°C y la temperatura media del mes más caliente entre 6.5 y 22°C. La precipitación anual promedio es de 700 mm. El tipo de clima, según el sistema de clasificación de Köpen, modificado por García (1973) está representado por la fórmula C(w1)(w)b(i') (Ruiz, 2000).

La precipitación en la zona durante el verano (w), con una media anual calculada mediante el método de isoyetas de 701.7 mm equivalente a 376 586 974.8 m³. La distribución temporal en el año se acentúa entre mayo y septiembre con el 75.2% de la lluvia anual. De abril a octubre precipita el 13.2 % de la lluvia anual y entre noviembre y marzo se registra el periodo más seco con el 11.6% de la lluvia anual. (Ruiz, 2000).

Para conocer las características del clima de la región de estudio, se reunió la información de cuatro estaciones meteorológicas cercanas al lago. En la tabla 1 se muestran los datos de temperatura media mensual y media anual en °C y la precipitación media mensual y media anual en mm de las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio (Rodarte 1986 y Ruiz, 2000).

Tabla 1.- Datos de temperatura media mensual y media anual en °C y precipitación media mensual y media anual en mm.

Estaciones /meses		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANUAL
APAN ^b	T	10.3	11.3	14.3	16	16.9	16.2	15.1	15	15	13.9	12	10.9	13.9
	P	7.7	16.1	21.1	39.8	71.2	103.4	111.6	119	81.4	41.8	18.2	6.4	637.7
EL ASERRADERO ^b	T	7.4	9.4	11.5	13.2	13.5	12.7	11.4	11.5	11.5	9.7	9.4	8.6	10.8
	P	15.3	21.3	17.9	58.8	75.6	151.8	152.9	108.8	79.3	33.8	16	9.5	741
SAN LORENZO SAYULA ^b	T	11.7	12.3	15.5	16.9	17.3	15.9	15	14.7	14.5	13.8	12.6	11.8	14.3
	P	7.3	12.9	15.7	36.3	66.9	122.7	105.6	108.3	126.9	54.5	22	7.9	687.2
SAN MIGUEL ALLENDE ^a	T	10.6	11.2	13.2	14.8	15.2	15.1	14.4	14.6	14.5	13.4	12.1	10.8	13.3
	P	13.6	9.9	15.3	40.4	51.7	114.4	118.1	124.1	82	39.5	18.6	8	635.7

T.- temperatura y P.- Precipitación (fuente: ^a Rodarte,1986 y ^b Ruiz, 2000)

En la figura 4 se muestran las temperaturas medias registradas, por las estaciones meteorológicas cercanas al lago.

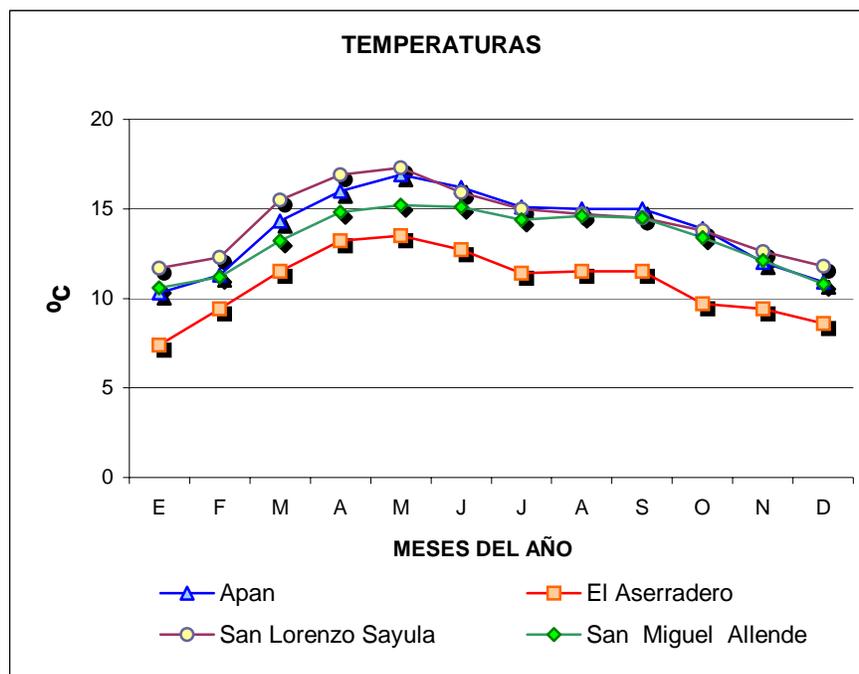


Fig. 4- Temperaturas registradas en cuatro estaciones meteorológicas cercanas al lago de Tecocomulco (fuente: Ruiz, 2000)

En la figura 5 se muestran las precipitaciones medias registradas, por las estaciones meteorológicas cercanas al lago.

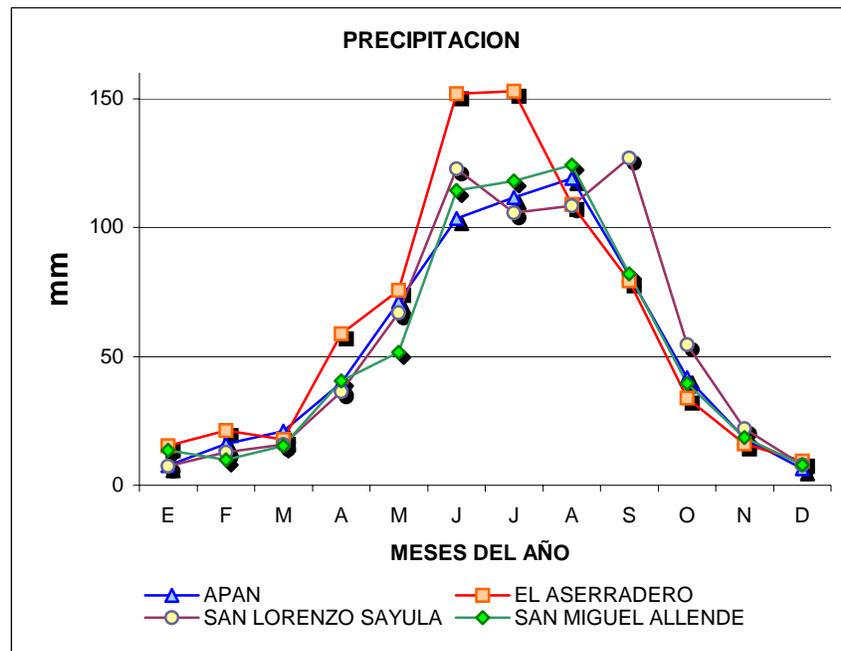


Fig. 5.- Precipitaciones registradas en cuatro estaciones meteorológicas cercanas al lago de Tecocomulco (fuente: Ruiz, 2000)

Suelos

Los tipos de suelos que se encuentran en la zona de acuerdo a la FAO-UNESCO (1985) son: Cambisol, Feozem, Fluvisol, Gleysol, Litosol, Luvisol, Planosol, Regosol y Vertisol. El tipo Vertisol Pelico tiene una textura fina, con mal drenaje, poca porosidad, son duros, al secarse se inundan y tienen problemas de labor. También tiene fase dúrica y se encuentra al noreste del municipio de Tepeapulco y abarca los alrededores del lago de Tecocomulco, indicando un factor para la existencia del lago (Rodarte, 1986).

El principal uso del suelo en la subcuenca de Tecocomulco es agropecuario y los cultivos agrícolas de temporal que la rodean son la cebada y el maíz principalmente, aunque se consideran otros como el frijol, alfalfa, sorgo, trigo, avena y papa. La cebada llegó a sustituir el cultivo de maguey, que ocupaba en 1970 una superficie de 0.29 km². Pero en la actualidad este sitio es uno de los principales proveedores de la cebada para la Cervecería Modelo (Rodarte, 1992).

Vegetación

En el caso de la vegetación terrestre circundante, en las partes altas existen bosque de coníferas y bosque de encinos, mientras que en las partes bajas y en las laderas de los cerros se encuentran bosques de cedros (*Juniperus* spp) y de matorrales asociados con agaves, encinos (*Quercus* spp.), *Eupatorium* spp. y *Stevia* spp. (Granados et al., 2000, Avalos y Román, 2000). Los bosques de coníferas están representados por los géneros de madroños (*Arbutus xalapensis*), *Bacharis conferta*, *Stevia salicifolia*, *Eupatorium glabratum* y *Buddleia microphyla*. Los bosques de *Juniperus* son considerados comunidades secundarias de los bosques de coníferas (Caballero et al., 1999). La vegetación ha sufrido drásticos cambios de lo que originalmente era, ya que antes eran zonas boscosas de pino y encino, pero por la deforestación, en la actualidad la vegetación natural de la subcuenca esta bastante modificada y aun quedan árboles aislados como indicios de que el área boscosa era mucho mayor que la actual. El bosque original de pinos, encinos y abetos está remplazado por vegetación de matorral, integrado por plantas herbáceas, xerófitas, magueyes y nopal silvestre (Ruiz, 2000). La composición de estos bosques es variable, hay presencia de elementos los matorrales xerófilos como *Mimosa biuncifera*, *Zaluzania augusta*, *Opuntia streptacanta* y *Agave atrovirens* (Caballero et al., 1999). Sólo en las partes más altas del relieve se conserva el bosque, en zonas de lomeríos y pie de monte predomina el matorral (Ruiz, 2000).

Flora acuática y fauna del lago

La vegetación acuática del lago se caracteriza por presentar vegetación enraizada y flotante, en los márgenes hay semi-sumergida o palustre y algunas plantas flotantes (Ruiz, 2000), como se puede observar en las figuras 6 y 7 que presentan el perfil de la vegetación del lago y la distribución y disposición más frecuente de las asociaciones de hidrofitas presentes, respectivamente, determinado por Lot y Novelo (1978); distribuido en el centro principalmente se encuentra el tule (*Schoenoplectus californicus*) y lentejuela (*Lemna*) en las orillas, ésta ultima sirve de alimento para patos, gallaretas y al carmelillo (Ruiz, 2000). Así como algunos pastos y ninfas en donde viven algunos protozoarios y sanguijuelas (Ruiz, 2000). Las especies más representativas en el sistema son: *Najas guadalupensis*, *N. flexis*, *Potamogeton foliosus*, *P. filiformis*, *P. pectinatus* y las flotadoras *Lemna gibba*, *L. perpusilla* y *Wolfia papulifera*. Hacia la zona litoral crecen *Polygonum punctatum*, *P. lapathifolium*, *Lilae subulata*, mientras que *Azolla carolineana* se desarrolla en áreas inundadas estacionalmente. Caballero et al. (1999), en su estudio paleoambiental de los sedimentos lacustres de la porción noreste del lago, reporto los siguientes taxas de diatomeas: *Cocconeis placentula* var. *Lineata*, *Fragillaria construens*, *Stephanodiscus aff. medius*, *S. niagarae*, *Aulocoseira* spp y *Epithemia sorex*. Así mismo Caballero et al. (1999), reporto los siguientes taxas de algas: *Mougeoria latevirens*, otras especies de *Mougeoria*, *Zygnema* spp, *Spirogyra* spp. y *Debarya* spp y Nobelo et al citado por Jiménez (2001), reporta una flora ficologica con mas de 122 especies,

compuesta por miembros de las divisiones Cyanoprokaryota, Chlorophyta, Heterokontophyta y Euglenophyta (Tabla 2).

La comunidad planctónica es casi totalmente ausente y las comunidades perifíticas se encuentran distribuidas en la zona litoral y central del lago, en la primera se encuentran las mas ricas y diversas y en la segunda solo las que están asociadas con las macrofitas completamente sumergidas (Nobelo et al., 2000).

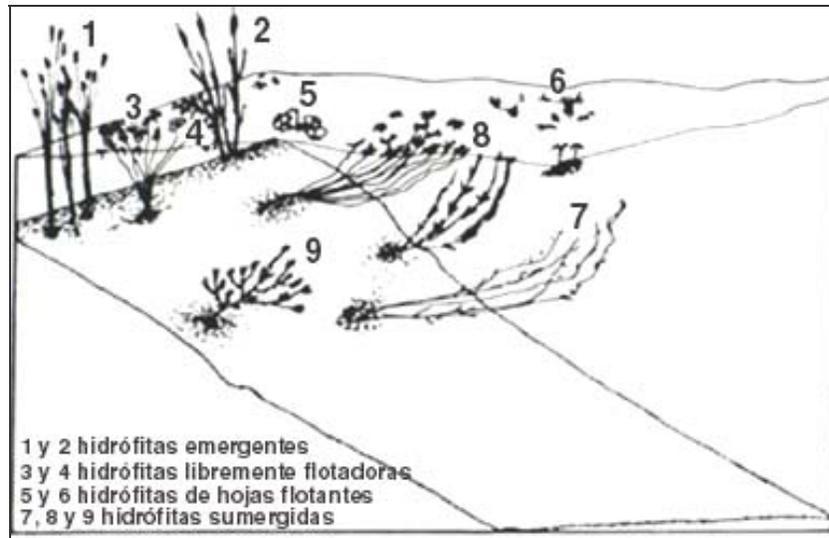


Fig. 6.- Perfil de vegetación del lago de Tecocomulco con las formas de vida más usuales de las plantas acuáticas en este ambiente, según Lot y Novelo (1978).

En relación con la fauna existen 120 especies de aves, equivalente a un 12 % de la avifauna total de México y 53% del total de la cuenca. De las 120 especies, 45 son acuáticas (37.5%) y 75 (62.5%) son terrestres. Entre las acuáticas 37 son migratorias y ocho son residentes (Jiménez y Juárez, 1996). Entre las especies acuáticas se encuentran, el garzón blanco (*Casmerodius albus*), la garza chapulinera (*Bubulcus ibis*), la garcita blanca (*Egretta thula*), el garzón gris (*Ardea herodias*), la garcita gris (*Egretta caerulea*), la garza nocturna (*Nycticorax nycticorax*), el corvejón o atotola (*Plegadis chihi*), el pato cuaresmeño o tempatlahoac (*Anas clypeata*), la cerceta de alas azules (*A. Discors* y *A. Crecca carolinensis*), la gallareta (*Fulica americana*) y la polla o gallina de agua (*Gallinula chloropus*). Entre las aves terrestres está la urraca o zanate (*Quiscalus mexicanus*), el tordo charretero (*Agelaius phoeniceus*), la golondrina común o cuicuitzcatl (*Hirundo rustica*) y el gorrión doméstico, el ingles o chillón (*Passer domesticus*) (Ruiz, 2000).

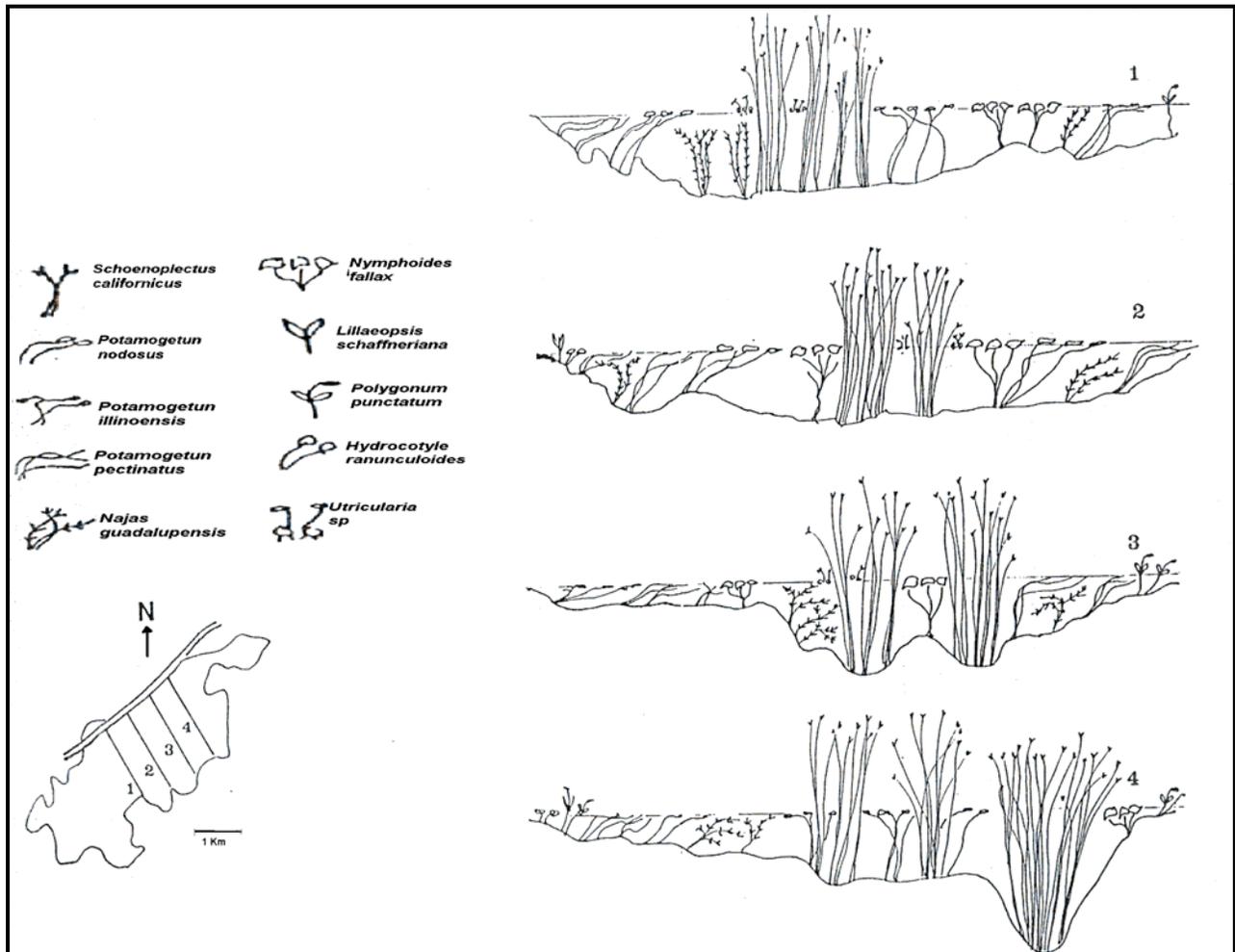


Fig. 7.- Distribución y disposición de fanerógamas acuáticas en el lago de Tecocomulco.

Determinado por Lot (1978) y tomado de Jiménez (2001)

En el lago la fauna netamente lacustre son peces de la clase Osteichthyes, como el charal (*Chyrostoma jordani* y *Chyrostoma* sp), la carpa escamada o criolla (*Cyprinus carpio*), la carpa herbívora (*Ctenopharingodon idellus*), la carpa Israel (*Cyprinus carpio-specularis*) y la carpa plateada (*Hypophthalmichthys molitrix*). En cuanto a los anfibios esta el ajolote (*Amystoma mexicanum*), la rana de moctezuma (*Rana montezumae*), la rana toro (*Rana catesbiana*), la salamandra (*Ambystoma tigrinum*) y el tlaxólotl (Chávez, 1981, Ángeles, 1986, Jiménez y Juárez, 1996, Jiménez y Juárez, 2000, Ruiz, 2000 y Jiménez, 2001).

Tabla 2.- flora ficológica del lago de Tecocomulco

División	Ordenes	Especies
Cyanoprokaryota	Chroococcales, Oscillatoriales y Nostocales	<i>Snowella spp, Mycrocystis spp, Coelomoron spp, Arthrospira spp, Wollea spp.....</i>
Chlorophyta	Chlamydomonadales, Volvocales, Tetrasporales, Chlorococcales, Protosiphonales, Ulotrichales, Oeodogoniales, Chaetophorales, Closteriales, Desmidiiales, Zygnematales y Charales	<i>Chlamydomona spp, Chaetophora spp,</i>
Heterokontophyta	Mischococcales, Tribonematales, Vaucheriales, Ochromonadales, Pennales y Centrales.	<i>Achnanthes spp, Amphora ovalis, Cocconeis spp, Eunotia spp,</i>
Euglenophyta	Euglenales	<i>Euglena spp</i>

Fuente: Nobelo et al. (2000)

Orografía

La subcuenca de Tecocomulco se localiza en la porción centro –oeste de la faja volcánica trans-mexicana cerca de la Sierra madre Oriental. Tiene una forma elíptica NE-SO. En su interior se localiza una planicie de 2950 msnm. Está rodeada por sierras volcánicas del Terciario y Cuaternario (Chichicuautila al noroeste, y Tepozan al sureste). El volcán de la Paila, la caldera de Chichicuautila y varios conos cineríticos (el Tío Lolo, Coatzetzingo, Viejo y Seco) constituyen el relieve hacia el sur de la sierra de Chichicuautila. La Sierra de Tepozán separa a las subcuencas de Tecocomulco y Tochac (hasta 3300 msnm). En el norte de esta sierra están los volcanes de Cocinillas y Coyotes, además de otros cerros como: Cerro La Peña y Cerro las Tetillas y otros pequeños cerros aislados: Loma Larga, Loma de Ojuila, Cerros de Santa Cruz, Mazatepec, La Clandria y Buenavista (Ruiz, 2000).

La subcuenca está delimitada hacia el este por los volcanes de Tecoloquillo y la Minilla y la caldera de Acolulco. Estos se emplazaron en una mesa volcánica NE-SO, cercana a la Sierra Madre

Oriental. Al suroeste, el drenaje entre las subcuencas de Tecocomulco y Apan está parcialmente interrumpido por una cadena de conos cineríticos con dirección NE-SO, emplazada en la parte media de la planicie. El Cerro Viejo de Tultengo es un cono cinerítico de la parte norte de esta cadena. (Vilchis et al., 2000) (Fig. 8).

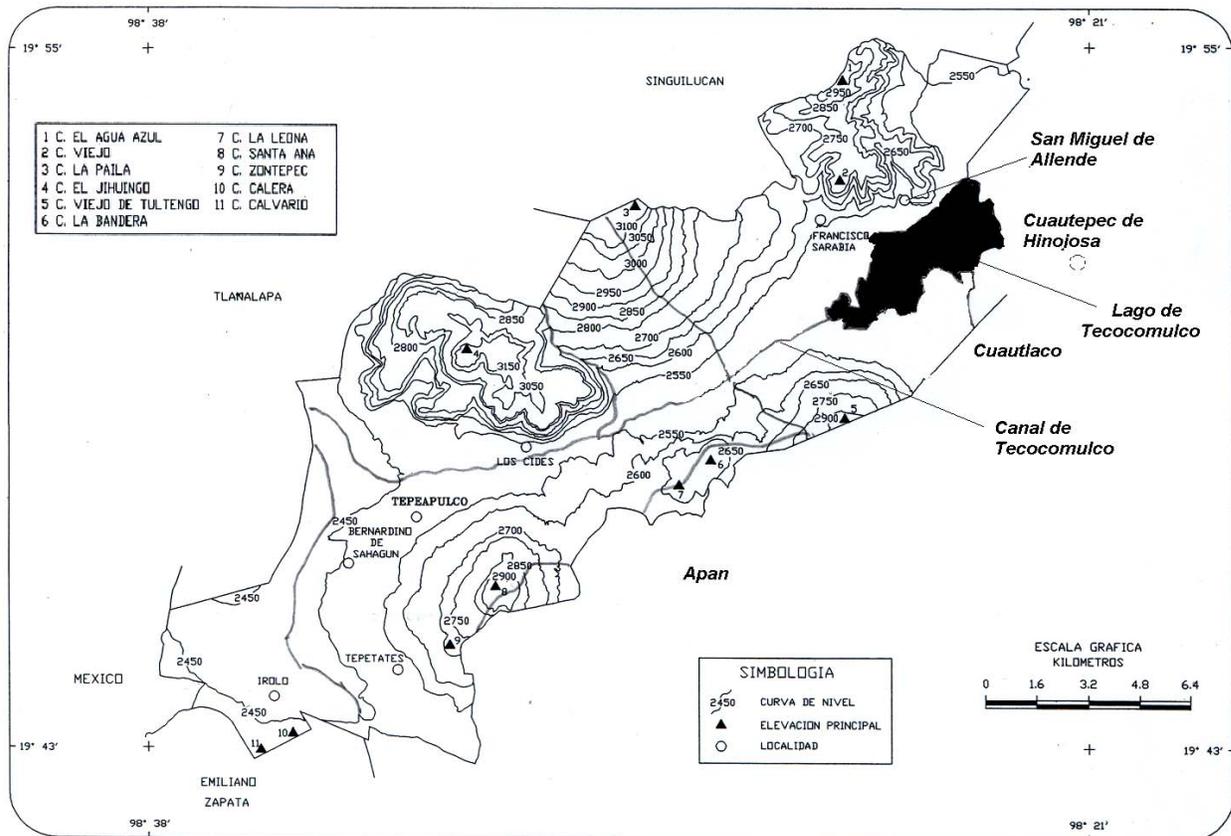


Fig. 8.- Orografía e Hidrografía que rodean al lago de Tecocomulco, en el municipio de Tepeapulco. (Escala 1:50000 fuente: INEGI c, 1995)

Hidrografía:

En la cuenca del valle de México se han identificado once zonas hidrológicas que caracterizan un igual número de subcuencas; el lago de Tecocomulco pertenece a la subcuenca de Tecocomulco y ésta a su vez forma parte de la zona XI y que conjuntamente con las de Apan y de Tochac, no pertenecían originalmente a la cuenca del valle de México, pero debido a la realización de algunas obras hidráulicas durante el siglo XX, se consideran como partes de la misma (Fig. 9). El volumen de aguas superficiales en la subcuenca de Tecocomulco se estimó de 11,746 miles de m³ (Alatríste, 1999).

La subcuenca está compuesta de numerosos manantiales, arroyos torrenciales, ríos permanentes y un cuerpo de agua que ocupa la parte mas baja, el lago de Tecocomulco. De los 3 ríos permanentes dos nacen en la Sierra del Tepozán: el río Tepozán y el río Cuatlaco. Un tercer río se inicia en la Sierra de Chichicuatla en el noreste, conocido localmente como Canoas (Ruiz, 2000).

Los arroyos existentes son abundantes en toda la cuenca, de carácter intermitente, en la parte norte de la cuenca; los arroyos frecuentemente desaparecen debido a que existen grandes fracturas en las rocas por donde se infiltra el agua que llevan (Lagarde, 1992).

Las presas que circundan al lago son la presa Tesoyo, construida en los 40's y solo almacena agua en la época de lluvias, la presa Benito Juárez que capta las aguas del río Coatlaco y localizada cerca del poblado de Alcantarillas, en esta zona se hallan los manantiales más grandes de la cuenca los cuales antes eran de agua cristalina pero con la construcción de la presa sus aguas se enturbiaron y la presa del Puerco que es la mas pequeña y se encontraba azolvada (Lagarde; 1992).

El aporte de agua subterránea se manifiesta por algunos manantiales que a lo largo del año aumentan o disminuyen su descarga dependiendo de la época del año. La mayoría de los manantiales son aprovechados para abastecer de agua a los poblados inmediatos a ellos conduciendo el agua por tuberías. Los pozos y norias que hay dentro de la subcuenca se explotan para consumo humano (Ruiz; 2000), la mayoría de ellos se localizan en la parte sur y sur oriental de la cuenca, debido a que en la parte norte no existen rocas impermeables que detengan y hagan que salga el agua infiltrada hacia la superficie (Lagarde, 1992).

Al este del lago se halla un gran número de canales construidos para agilizar el escurrimiento de las zonas agrícolas y evitar que afecten las tierras de cultivo y en el extremo suroeste se halla el canal de Tecocomulco, actualmente este canal, de 6 km construido al suroeste del lago entre los cerros La Paila y La Cruz, con el gran aporte de sedimentos arrastrados por las corrientes superficiales, se encuentra azolvado, propiciando con ello la inundación de los terrenos bajos, pero la existencia de resumideros y grietas en las rocas que permiten la infiltración han sido utilizados para dirigir las crecidas del lago y evitar las inundaciones (Ruiz, 2000). Entre otros canales y que destaca por su magnitud es el canal de Tepozán que descarga sus aguas al lago en la parte noreste del mismo (Lagarde, 1992).

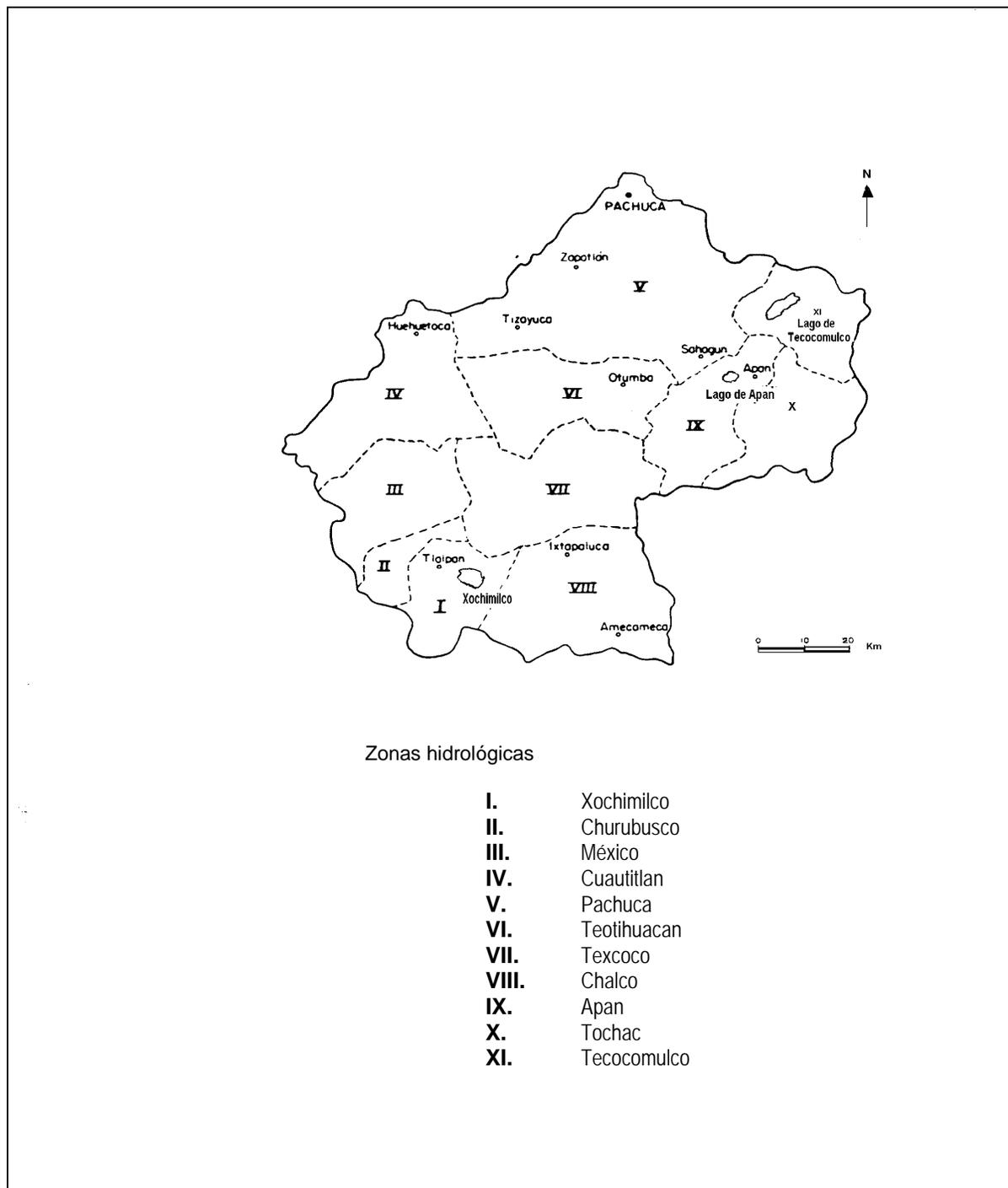


Fig. 9.- Subdivisión hidrográfica de la cuenca del valle de México (Modificado de Alatríste, 1999)

El escurrimiento superficial de la subcuenca ocurre durante o inmediatamente después de los meses lluviosos (de mayo a octubre), en los meses restantes los escurrimientos empiezan a

descender hasta el grado que la mayoría de ellos se infiltra y evaporan (de enero a marzo) (Ruiz, 2000).

La relación entre la precipitación y el escurrimiento establece que el escurrimiento total de 1981 a 1985 no fue superior a una diezmilésima parte de la precipitación, la razón que explica la desigual proporción se debe a la infiltración y a la evapotranspiración en el interior de la subcuenca y porque la mayor parte del agua en escurrimiento se queda en el lago, en las presas y en los jagüeyes existentes (Ruiz, 2000).

Estratigrafía

El origen de Tecocomulco inicia con la devastadora erupción pliniana ocurrida posiblemente hace aproximadamente 50,000 años Antes del Presente. Posteriormente a esta erupción y hasta hace cerca de 42,000 años Antes del Presente. Tecocomulco fue un lago moderadamente profundo, de aguas dulces a levemente ácidas, con abundante vegetación acuática. Los conjuntos de polen y diatomeas indican que el lago era levemente más extenso que el actual. El polen regional está bien representado e indica la presencia de bosques extensos de coníferas los géneros *Pinus*, *Picea* y *Abies*. El espectro de polen constituido por este conjunto de árboles sugiere condiciones climáticas más húmedas y frías que las actuales (Caballero et al., 1999).

Aspectos culturales

En esta zona existen aproximadamente 14,900 habitantes distribuidos en 11 localidades principales que son: Paredón, Tres cabezas, Tepozan, Tecocomulco, Coyuco, Francisco Sarabia, Cocinillas, Tultengo, Alcantarillas y San Miguel Allende (Huizar., et al. 2001). Las localidades mencionadas pertenecen a tres municipios del estado de Hidalgo y son presentados en la tabla 3.

Tabla 3.- Municipios, localidades y cuerpos montañosos que circundan el lago

Municipio	Ubicación	Localidades	Cuerpos montañosos
Tepeapulco ^a	El lago se halla en la parte noreste del municipio y a 8 km de distancia, a los 19°50' y 19° 52' N y 98°22' y 98°26' O	Francisco Sarabia San Miguel Allende Tultengo San José Vista Hermosa	Cerro Agua Azul Cerro Viejo Cerro Viejo de Tultengo Cerro Paila Salida de agua del Canal de tecocomulco
Cuautepec ^b	El lago se halla en la parte suroeste del municipio a los	Mazatepec Tecocomulco de Juárez	Entrada de agua del canal Tepozán

Municipio	Ubicación	Localidades	Cuerpos montañosos
	19°52' y 19° 54' N y los 98°21' y 98°23' O.	La Isleta	
Apan ^c	El lago se ve influenciado por el lado noroeste del municipio a los 19°50'y 19° 52' N y los 98°22' y 98°26' O.	Cocinillas Alcantarillas Santa Cruz	Cerro Viejo de Tultengo y Cocinillas Entrada de agua del Canal de Cuautlaco

Fuente : carta Topográfica de Ciudad Sahagun E14 B12, 1974 del Cetenal, escala 1:50,000

a) INEGI b (1995). Cuadernos Estadísticos Municipales de Tepeapulco.

b) INEGI a (1995). Cuadernos Estadísticos Municipales de Cuatepec.

c) INEGI (1994). Cuadernos Estadísticos Municipales de Apan

El municipio de Tepeapulco es donde se encuentra la mayor superficie del lago, seguido de Cuatepec y por último de Apan. Aunque los ecosistemas no conocen límites municipales, es importante considerar que las actividades socioeconómicas de un municipio, ciudad o país, pueden alterar el entorno y repercutir de diversas formas en la transformación de los recursos naturales (INEGI, 1995).

La principal actividad económica de la población es la agricultura, complementada con la ganadería principalmente ovina de forma extensiva. La agricultura es de temporal y sus principales productos son la cebada, avena, maíz, en algunos sitios se cultiva papa y haba, los productos agrícolas casi siempre están comprometidos con el mercado exterior regional. Otras actividades de importancia local son la pesca y la caza del pato garza, que constituyen una fuente de comercio local en menor proporción que la agricultura y la ganadería ovina (Huizar., et al, 2001). Siendo la acuicultura una actividad que representa un papel mínimo en el desarrollo económico de los municipios a pesar de contar con cuerpos de agua y siendo solo la carpa la especie mayormente sembrada (INEGI-SIMBAD, 1998).

La silvicultura no ha sido desarrollada, ni tecnificada, y solo se da una sobreexplotación que aunado a los incendios forestales y la mala organización entre los ejidos productores de madera, han provocando la deforestación, siendo Cuatepec el municipio que cuenta con 20 permisos por parte de la SEMARNAT para extracción de madera y en el caso de Tepeapulco cuenta con 1 permiso (INEGI, 2002).

Es notorio que ha habido una disminución de la población rural y un aumento de la población urbana; Rodarte (1986) lo atribuye a la creación de un complejo industrial en Ciudad Sahagún en el sureste de Hidalgo, el cual vino a revolucionar el ambiente rural de la explotación pulquera y del

maíz para comenzar la estructura de una nueva región industrial-agrícola; y por la gran influencia urbana de Pachuca y del D.F. También es necesario considerar el alto grado de marginación que hay en Hidalgo (CONAPO y PROGRESA, 1999) que por lo que respecta a los municipios éstos cuentan con un grado de marginación bajo como en el caso de Tepeapulco y Apan, mientras que en Cuautepec está en el nivel medio.

METODOLOGÍA

Para evaluar la calidad del agua del lago se efectuaron cuatro salidas a lo largo de un año, abarcando las estaciones de estiaje y de lluvia en la zona y se determinaron *in situ* los parámetros como: temperatura, oxígeno disuelto (OD), pH, Sólidos Totales Disueltos (STD), conductividad, visibilidad del disco de secchi y la profundidad. Las muestras de agua fueron colectadas en una botella Niskin de dos litros y posteriormente en el laboratorio se analizaron los siguientes parámetros: nitrógeno total (Nt), amonio (NH₄), nitrato (NO₃), nitrito (NO₂), fósforo total (Pt), ortofosfatos (PO₄), dureza, Demanda Química de Oxígeno (DQO), alcalinidad y siete metales pesados: níquel, cadmio, zinc, cobre, fierro, plomo y cromo. El muestreo para la evaluación de los metales traza en agua se realizaron en mayo y agosto y para los metales en sedimento se realizaron en noviembre. Todos los análisis de los parámetros fisicoquímicos y de los metales se realizaron de acuerdo a las técnicas indicadas en el APHA, 1994.

En la tabla 4, se establecen los parámetros evaluados para el estudio fisicoquímico del agua del lago y divididos en sus propiedades de conservativos y no conservativos.

Tabla 4.- Parámetros conservativos y no conservativos evaluados en el Lago de Tecocomulco

Parámetro conservativos	Unidades de medida	Parámetros no conservativos	Unidades de medida
Temperatura	°C	Oxígeno disuelto	mg/l
Conductividad	μS/cm	nitritos	μM
pH		nitratos	μM
Alcalinidad total	mg/l de CaCO ₃	amonio	μM
Dureza total	mg/l de CaCO ₃	ortofosfatos	μM
Visibilidad del disco de Secchi	cm	Metales pesados	ppm

Las estaciones de muestreo se eligieron de acuerdo a las fuentes difusas de posible contaminación circundantes al lago como son las de influencia antropogénica a través de la agricultura y de la ganadería; la presencia de localidades cercanas, las corrientes y canales afluentes al lago y los cuerpos montañosos así como la presencia o ausencia de macrofitas (tule y macroalgas). Teniendo en total 16 estaciones, enlistadas en la tabla 5 y ubicadas en el mapa del lago (Fig. 10). Las muestras de agua se tomaron en la mitad de la columna de agua, tomando solo una muestra por estación y por mes.

Zonación del lago de Tecocomulco

Para explicar la posible variación espacial de los parámetros fisicoquímicos y de la concentración de metales en agua y sedimento en el lago, este se dividió en cuatro zonas considerando los cuatro puntos cardinales y obteniendo así las zonas: noroeste, noreste, suroeste y sureste.

En la tabla 5 se muestra los nombres y la ubicación de las zonas de estaciones de muestreo en los cuatro puntos cardinales en que se dividió el lago.

Tabla 5.- Estaciones de muestreo para el estudio fisicoquímico del lago de Tecocomulco

Estación	Nombre de la estación	Ubicación en el mapa
E- 1	zona de Chinampas *	Noroeste (NO)
E- 2	zona de la Cañada de Padilla *	
E- 3	zona del Charco *	Suroeste (SO)
E- 4	Zona frente a Corralillo y Parcela Abundio *	
E- 5	Zona de Parcela de Vargas *	
E- 6	Zona entrada de Río Corralillos *	
E- 7 ^a	Zona el Mirador o Canal de Tecocomulco *	
E- 8 ^a	Zona del Medidor *	
E- 9 ^a	Zona del Rancho de San José *	
E- 10 ^a	Zona el Maguey *	
E- 11	Zona Vista Hermosa *	
E- 12	Zona de Alcantarillas *	Sureste (SE)
E- 13	Zona de Cocinillas *	
E- 14	Zona de Mazatepec *	Noreste (NE)
E- 15	Zona de las Isletas y el Cerro Blanquilla *	
E- 16	Zona frente al embarcadero *	Noroeste (NO)

* nombres locales referidos por los pescadores

a.- estaciones de muestreo contempladas únicamente en el mes de marzo.

Cabe mencionar que las estaciones 7, 8 y 9 no pudieron ser evaluadas debido a la sequedad y bajos niveles de agua que presentó el lago en los meses de mayo, agosto y noviembre, lo cual se tomó en consideración para el análisis estadístico de los resultados.

Análisis estadístico de los resultados.

El análisis estadístico de los parámetros fisicoquímicos evaluados, fue utilizado para conocer el comportamiento que tuvo el lago durante un año, considerando las épocas de secas y de lluvias, llevando a cabo las pruebas estadísticas esenciales: **promedio, desviación estándar y error estándar**, haciendo uso del paquete de computo **Excel**. Para evaluar el comportamiento temporal de los parámetros evaluados se graficaron los promedios de cada uno de ellos en función de los meses de muestreo y de la misma manera con el objeto de detectar la presencia de variación espacial, se graficaron los valores de cada uno de los parámetros evaluados en función de cada una de las estaciones y meses de muestreo. Además de estos análisis que describen el sistema, se tuvo la necesidad de tener un conocimiento más cercano de la dinámica fisicoquímica del lago y para ello se realizó un análisis de correlación empleando la **matriz de correlación de Pearson** con una $p \leq 0.05$, utilizando el programa estadístico **STATISTICA 6** y los valores estandarizados de nuestros datos originales a fin de evitar efectos por los cambios de escalas de las variables tal y como lo recomienda Arredondo et al. (1984) esta prueba permite conocer el grado de asociación que tienen los parámetros evaluados.

Análisis cartográfico y uso de imágenes de satélite

Con el uso de la carta de INEGI c (1995) y el uso del programa de CAMRIS, se obtuvo el mapa del lago de Tecocomulco (Fig. 10), en donde se señalan las estaciones de muestreo, las localidades circundantes, las corrientes y canales afluentes al lago y los cuerpos montañosos aledaños.

Para el cálculo de la cobertura de vegetación acuática se utilizó la imagen de satélite del 2001 proporcionada por la SEMARNAT y con el uso del programa CAMRIS.

Análisis de la zona de estudio

Con la información ambiental obtenida y con la fluctuación temporal y espacial que se tuvo durante el periodo de estudio se caracterizó el comportamiento fisicoquímico del lago.

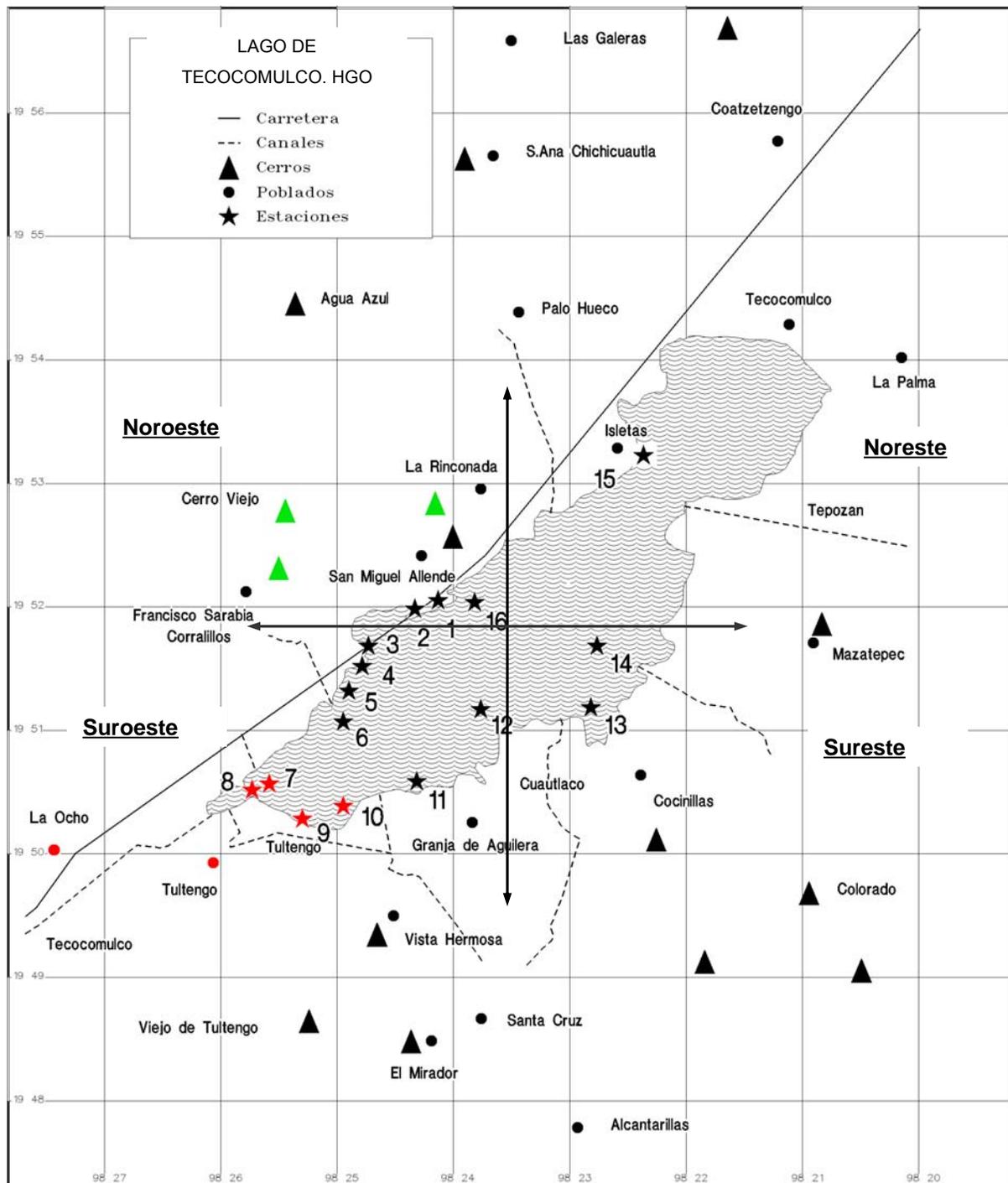


Fig. 10.- Ubicación de las 16 estaciones de muestreo en el Lago de Tecocomulco
 (fuente: mapa de INEGI c, 1995)

RESULTADOS

Los parámetros ambientales en el período de estudio mostraron un comportamiento espacio temporal heterogéneo, la figura 11 muestra el comportamiento de la temperatura, registrando las mayores en mayo y agosto; pero en marzo y noviembre, disminuyó aproximadamente la mitad. La mayor temperatura registrada fue de 20.33° C, DS± 3.13 en el mes de mayo y la más baja en noviembre 11.6° C, DS± 3.14.

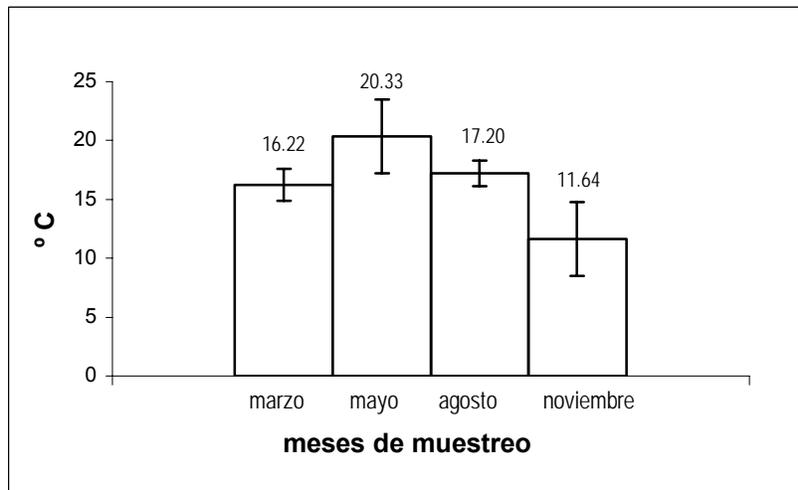


Fig. 11.- Temperatura: valores promedio y desviación estándar (±)

En la figura 12 se muestra el comportamiento de la profundidad, con una variación inversa de la temperatura; en mayo y agosto se registraron las menores profundidades de 0.62m, DS± 0.17 y 0.61m, DS± 0.21 respectivamente y con máximas temperaturas. La profundidad se incrementó a 0.85 m, DS± 0.57 en marzo y de 0.79 m, DS± 0.14 en noviembre.

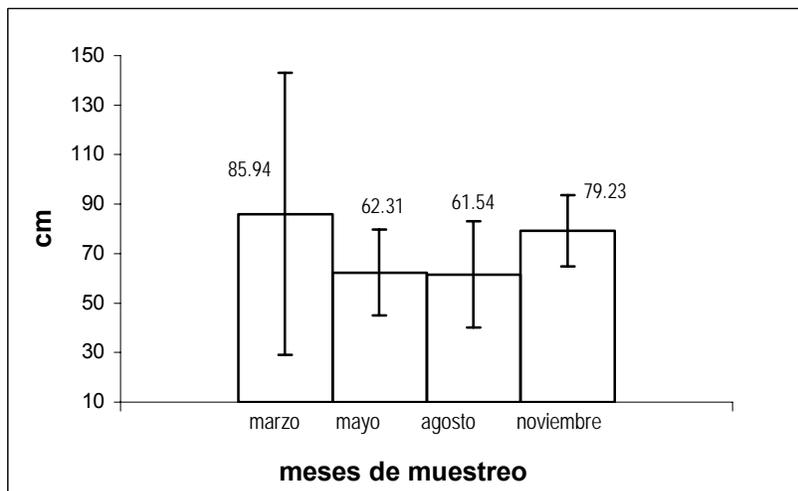


Fig. 12.- Profundidad: valores promedio y desviación estándar (±)

La visibilidad del disco de Secchi (Fig. 13), mostró los valores mas altos en el mes de marzo de 0.77m, $DS \pm 0.59$, así como una alta correlación con la profundidad con una $r = 0.91$, $\alpha = 0.05$ (Tabla 6).

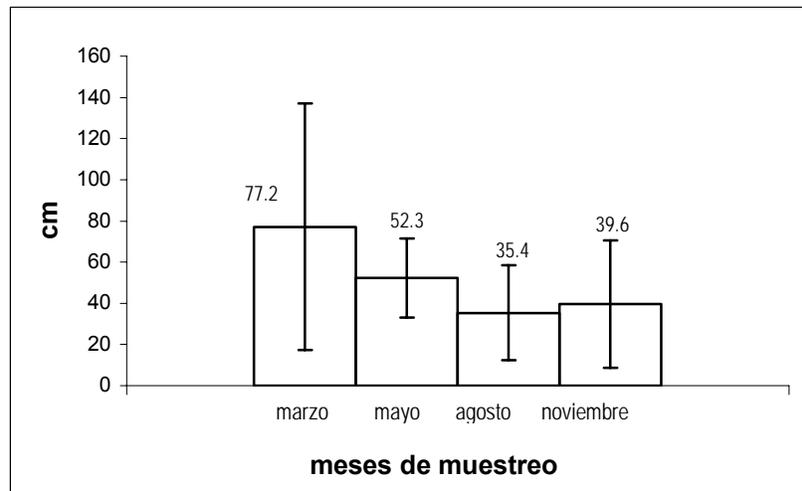


Fig. 13.- Visibilidad del disco de Secchi: valores promedio y desviación estándar (\pm)

Los sólidos totales disueltos (Fig. 14), señalaron una tendencia a la disminución siendo marzo el mes con el mayor promedio y noviembre el más bajo; no obstante la concentración mayor promedio de STD fue en este primer mes con un valor de 198.25 ppm, $DS \pm 26.54$ y en noviembre, de bajas temperaturas y baja precipitación la concentración de STD fue baja (129.54 ppm, $DS \pm 15.42$). Sin embargo en el mes de marzo los STD mostraron una baja correlación con la profundidad $r = 0.64$ y la visibilidad del disco de Secchi $r = 0.69$ (Tabla 6); en mayo la correlación con la visibilidad del disco de Secchi fue menor $r = 0.52$, $\alpha = 0.05$ (Tabla 7).

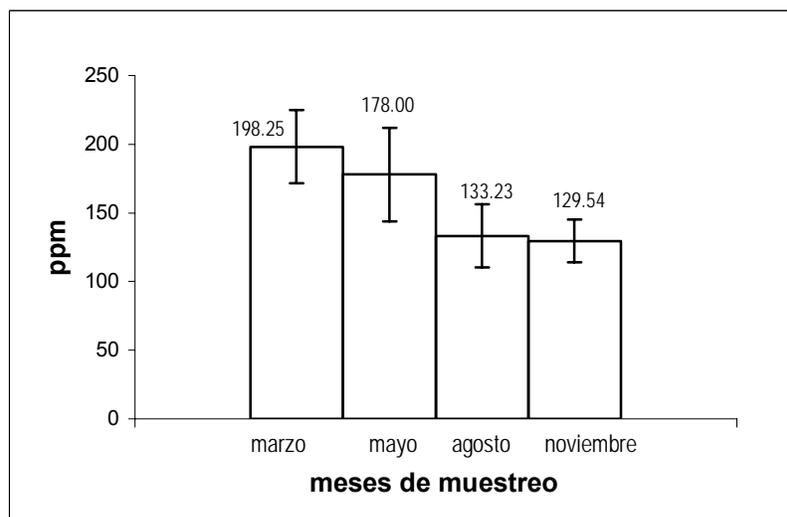


Fig. 14.- Sólidos totales disueltos: valores promedio y desviación estándar (\pm)

La conductividad, mostró un comportamiento semejante de la temperatura del lago; mayo fue la época más seca y de las más altas temperaturas del año, con el mayor nivel promedio de conductividad en el agua de 346.15 $\mu\text{S}/\text{cm}$, $\text{DS} \pm 43.98$ consecuencia de la alta evaporación en esta época del año. En los meses de noviembre y agosto la conductividad fue baja, siendo para el primer caso de 267.46 $\mu\text{S}/\text{cm}$, $\text{DS} \pm 45.81$ mes en el cual se registraron las temperaturas más frías del año y con baja precipitación y en el segundo caso cuando se presentaron las mayores precipitaciones de la zona en el año, con un promedio de conductividad más bajo de 247.38 $\mu\text{S}/\text{cm}$, $\text{DS} \pm 58.62$ (Fig. 15), debido a la disolución de sales. La conductividad tuvo una alta correlación en el mes de mayo con la temperatura con una $r = 0.89$ (Tabla 7) y en agosto con los STD con $r = 0.83$, $\alpha = 0.05$ (Tabla 8).

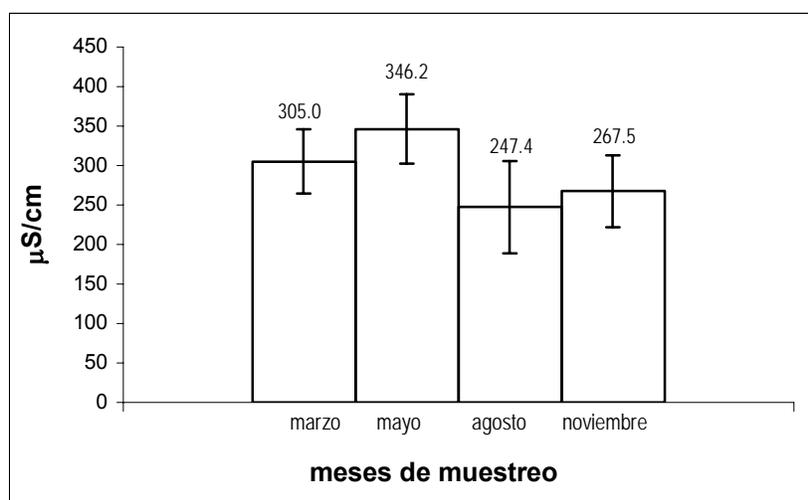


Fig. 15.- Conductividad: valores promedio y desviación estándar (\pm)

Tabla 6.- Correlaciones entre los parámetros fisicoquímicos del lago de Tecocomulco de las 16 estaciones de muestreo, en el mes de marzo ($p \leq 0.05$).

Parámetros	Profundidad	Visibilidad del disco de Secchi	Conductividad	O.D	STD	N-total	NO ₃	PO ₄
visibilidad del disco de Secchi	0.91							
conductividad	0.64	0.69						
STD	0.64	0.69	1.00					
DQO	0.57	0.57	0.87		0.87			
alcalinidad				0.66				
NO ₃						0.85		
PO ₄						0.86	0.70	

Parámetros	Profundidad	Visibilidad del disco de Secchi	Conductividad	O.D	STD	N-total	NO ₃	PO ₄
P-Total						0.88	0.80	0.97

Tabla 7.- Correlaciones entre los parámetros fisicoquímicos del lago de Tecocomulco de las 16 estaciones de muestreo, en el mes de mayo ($p \leq 0.05$).

Parámetros	profundidad	visibilidad del disco de Secchi	conductividad	O.D	PO ₄	NH ₄
temperatura	0.6		0.89			0.77
NO ₂	0.62					
NH ₄			0.57			
pH			0.53			
profundidad			0.73			
STD		0.52		0.83		
P-Total					0.57	0.51

Tabla 8.- Correlaciones entre los parámetros fisicoquímicos del lago de Tecocomulco de las 16 estaciones de muestreo, en el mes de agosto ($p \leq 0.05$).

parámetros	Profundidad	Visibilidad del disco de Secchi	Conductividad	O.D	STD	N-total	NO ₃	PO ₄	Temperatura	Dureza
pH	0.65								0.77	
O.D.		0.52								
alcalinidad			0.68							0.6
dureza				-0.66	0.54					
conductividad					0.83					
DQO					0.5	0.89				
NH ₄							0.69	0.5		
NO ₂	0.78									

Tabla 9.- Correlaciones entre los parámetros fisicoquímicos del lago de Tecocomulco de las 16 estaciones de muestreo, en el mes de noviembre ($p \leq 0.05$).

parámetros	O.D	STD	N-total	PO ₄	P-total	NH ₄
temperatura	0.7					
pH	0.65					
DQO		0.74				
dureza		0.53				

parámetros	O.D	STD	N-total	PO ₄	P-total	NH ₄
alcalinidad			0.6			
NO ₂				0.99	0.99	0.52
NO ₃			0.63			
PO ₄					0.99	0.53
P-total						0.56

Los valores promedio más altos de pH se registraron en mayo y agosto (8.82, DS± 0.72 y 8.46, DS± 0.90) respectivamente y tendiente a lo alcalino (Fig. 16), mientras que en marzo y noviembre los valores promedio alcanzados fueron bajos de 7.7, DS± 0.57 y 8.1, DS± 0.55 respectivamente, entre la neutralidad y la alcalinidad. En agosto el pH mostró una alta correlación con la temperatura $r = 0.77$, $\alpha = 0.05$ (Tabla 8).

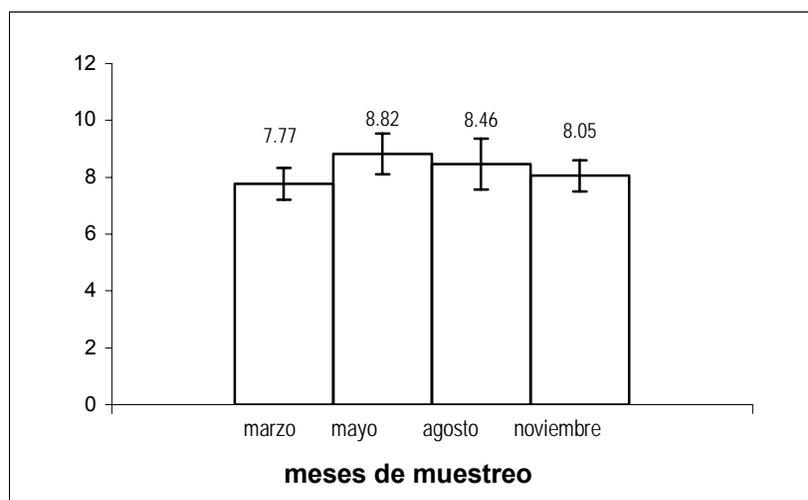


Fig.16.- pH: valores promedio y desviación estándar (±)

Los valores de alcalinidad más altos correspondieron al mes de marzo con 263.63 mg/l CaCO₃, DS± 116.56, siendo noviembre el mes que presentó el menor promedio 46 mg/l CaCO₃, DS± 24.85, observándose un decremento de este parámetro en el año (Fig. 17). La alcalinidad presentó una leve correlación en el mes de agosto con la conductividad $r = 0.68$, $\alpha = 0.05$ (Tabla 8).

La dureza presentó un comportamiento inverso a la alcalinidad, con promedios menores en los meses de marzo, mayo y agosto; registrándose en noviembre el valor promedio más alto 135.20 mg/l CaCO₃, DS± 25.16 (Fig. 18). En agosto se registró una baja correlación entre la dureza y la alcalinidad $r = 0.6$ y los STD $r = 0.54$ $\alpha = 0.05$ (Tabla 8). En noviembre hubo una ligera correlación entre la dureza y los STD $r = 0.53$ $\alpha = 0.05$ (Tabla 9).

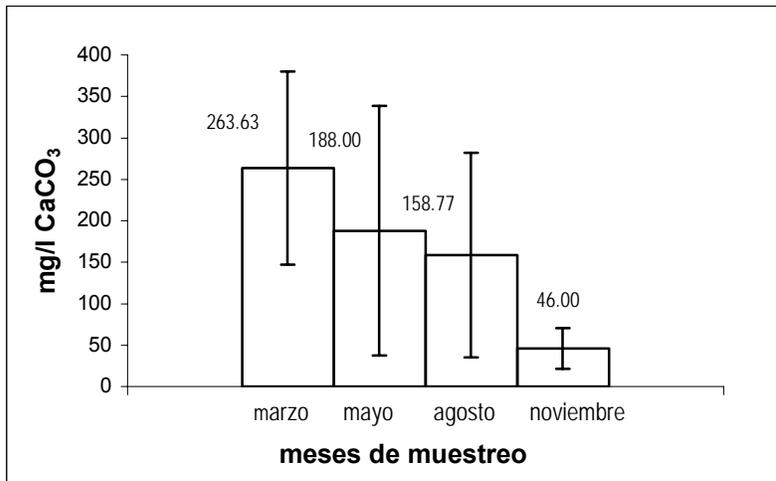


Fig. 17.- : Alcalinidad: valores promedio y desviación estándar (\pm)

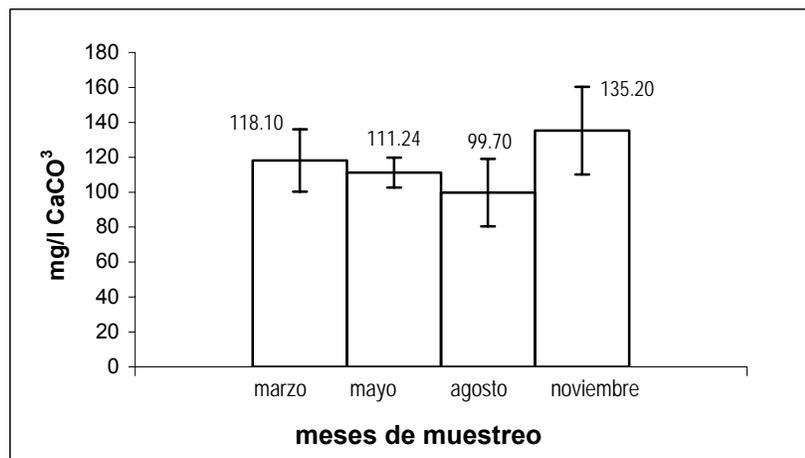


Fig. 18.- Dureza: valores promedio y desviación estándar (\pm)

El oxígeno disuelto mostró un comportamiento variable. Agosto fue el mes con las aguas más turbias y menos profundas que los meses restantes y registró el contenido mínimo promedio de oxígeno 1.84 mg/l, DS \pm 1.10; mientras que en mayo, con aguas de mayor visibilidad del disco de Secchi y temperatura, se registró el valor promedio más alto de 3.81mg/l, DS \pm 1.71 (Fig. 19). Mientras que en marzo y noviembre los promedios fueron de 3.15 mg/l, DS \pm 2.51 y 3.37 mg/l, DS \pm 1.44 respectivamente. En la época de lluvias las condiciones de anaerobiosis del lago fueron altas, mientras que los meses de más calor y frío propiciaron una mejor oxigenación del lago. En mayo se mostró una alta correlación con los STD con una $r = 0.83$ (Tabla 7) y en noviembre con la temperatura $r = 0.7$, $\alpha = 0.05$ (Tabla 9).

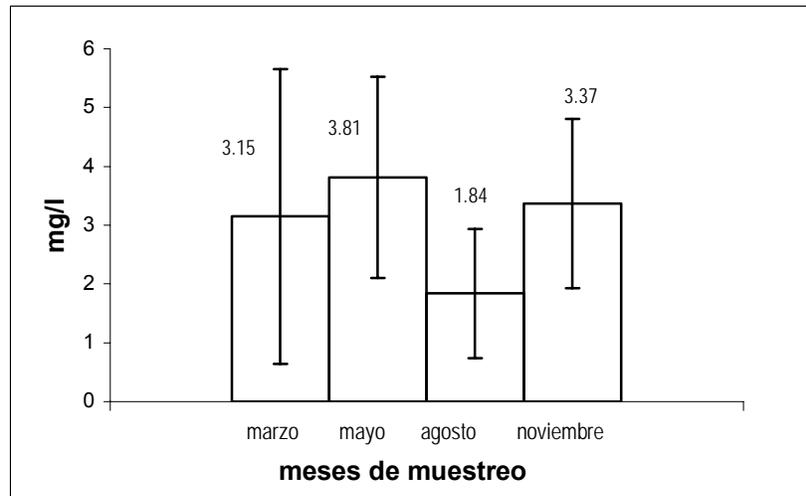


Fig. 19.- Oxígeno disuelto: valores promedio y desviación estándar (\pm)

La demanda química de oxígeno (DQO) fue variable al igual que el OD, con altos contenidos en noviembre de 13.28 mg O₂/l, DS \pm 1.24 (Fig. 20). Mientras que en los meses restantes y particularmente cuando comienza la época de calor en la zona, en el mes de marzo, registró el valor promedio más bajo de 7.55 mg O₂/l, DS \pm 0.90, presentando agosto y mayo niveles por encima de 8 mg O₂/l. Marzo presentó la más alta correlación entre la DQO y la conductividad con una $r = 0.87$, $\alpha = 0.05$. (Tabla 6).

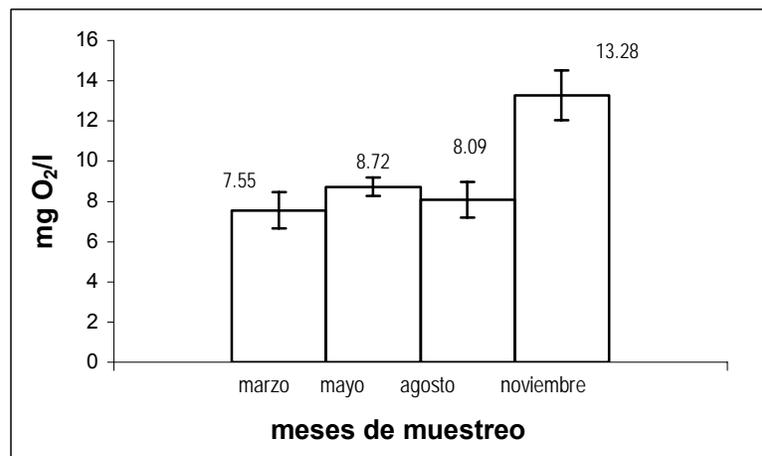


Fig. 20.- DQO: valores promedio y desviación estándar (\pm)

La concentración de nutrientes en el lago, fue muy variable y este comportamiento fue similar durante todo los meses de estudio. En el caso del nitrógeno total se registraron contenidos más altos que con respecto a las demás formas de nitrógeno evaluadas, con un valor promedio mayor de 566.31 μ M, DS \pm 211.60 en noviembre y el valor promedio menor en marzo de 78.20 μ M DS \pm

23.53 (Fig. 21). En agosto el nitrógeno total se correlacionó significativamente con la DQO $r = 0.89$, $\alpha = 0.05$. (Tabla 8).

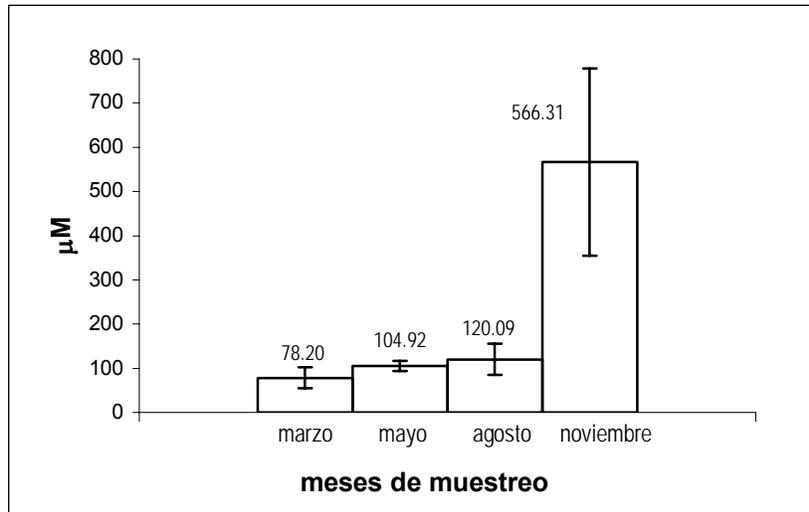


Fig. 21.- Nitrógeno total: valores promedio y desviación estándar (\pm)

Los nitratos (NO_3), registraron un valor promedio mayor en noviembre de $150.20 \mu\text{M}$, $\text{DS} \pm 99.24$ y menor de $28.10 \mu\text{M}$, $\text{DS} \pm 9.95$ en mayo (Fig. 22). Los nitratos representaron el 26 al 56 % del nitrógeno total. Este parámetro mostró una correlación alta con el nitrógeno total en marzo $r = 0.85$, $\alpha = 0.05$. (Tabla 6). Ambos parámetros tuvieron los valores más bajos en esta época del año y una débil correlación con el nitrógeno total en noviembre $r = 0.63$ (Tabla 9), pero muy significativa.

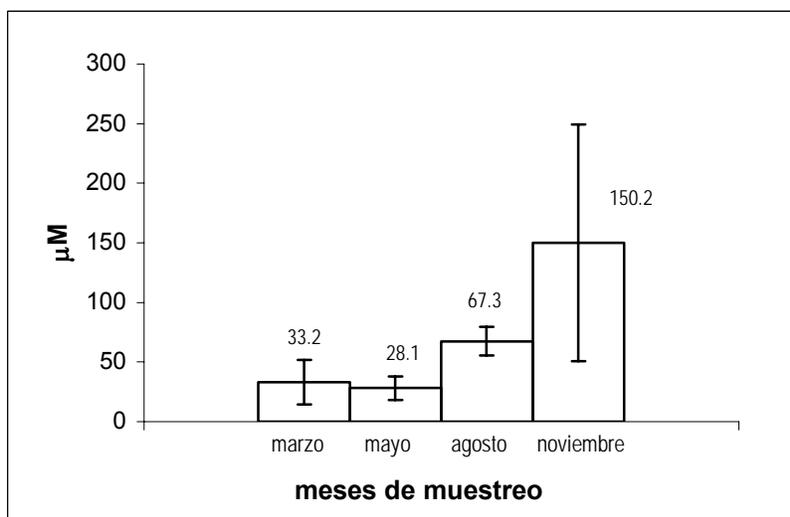


Fig. 22.- NO_3 : valores promedio y desviación estándar (\pm)

El contenido de amonio (NH_4), representó el 0.22 al 4.7 % del nitrógeno total y registro el valor promedio más alto en agosto de $5.65 \mu\text{M}$, $\text{DS} \pm 3.97$ y mas bajo en noviembre de $1.25 \mu\text{M}$, $\text{DS} \pm 1.21$ (Fig. 23). En mayo hubo una alta correlación entre la temperatura y el amonio $r = 0.77$, $\alpha = 0.05$. (Tabla 7) y en agosto este parámetro mostró una débil correlación con el NO_3 $r = 0.69$, $\alpha = 0.05$ (Tabla 8), pero muy significativa.

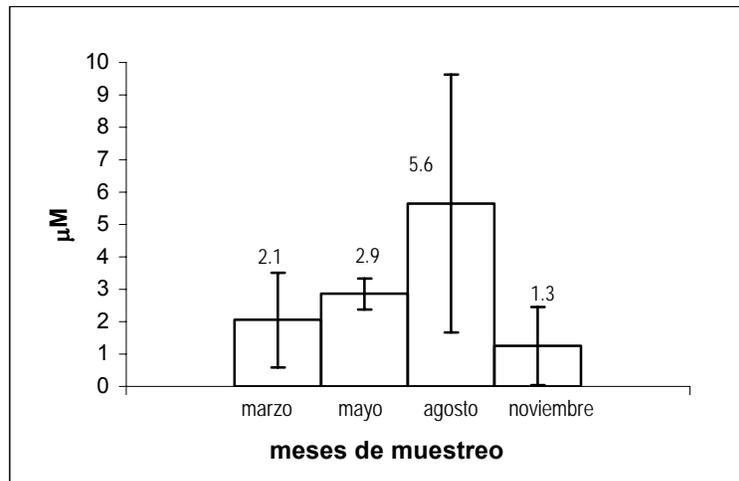


Fig. 23.- NH_4 : valores promedio y desviación estándar (\pm)

Los nitritos (NO_2), presentaron valores promedio mas altos semejantes en marzo y en agosto de 0.65 , $\text{DS} \pm 0.52$. Los nitritos representaron el 0.10 al 0.86% del nitrógeno total. En mayo estos tuvieron una correlación significativa con la profundidad $r = 0.62$, $\alpha = 0.05$ (Tabla 7) y en agosto altamente significativa $r = 0.78$, $\alpha = 0.05$ (Tabla 8).

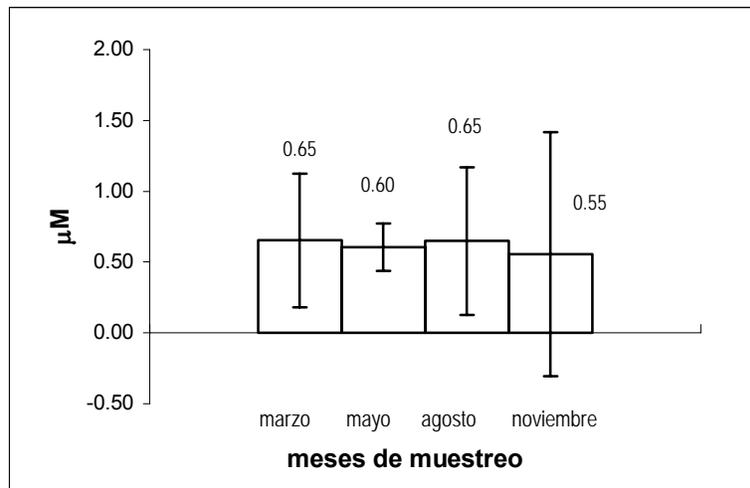


Fig. 24.- NO_2 : valores promedio y desviación estándar (\pm)

Los niveles mínimos y máximos alcanzados de fósforo total fueron de $1.82 \mu\text{M}$ y $24.23 \mu\text{M}$, siendo noviembre, el mes mas frío y agosto, el mes mas lluvioso, los que presentaron una mayor concentración promedio de $7.78 \mu\text{M}$, $\text{DS} \pm 5.46$ y $6.04 \mu\text{M}$, $\text{DS} \pm 2.19$ respectivamente (Fig. 25). En noviembre se registró una alta correlación entre este parámetro y los nitritos $r = 0.99$, $\alpha = 0.05$. (Tabla 9).

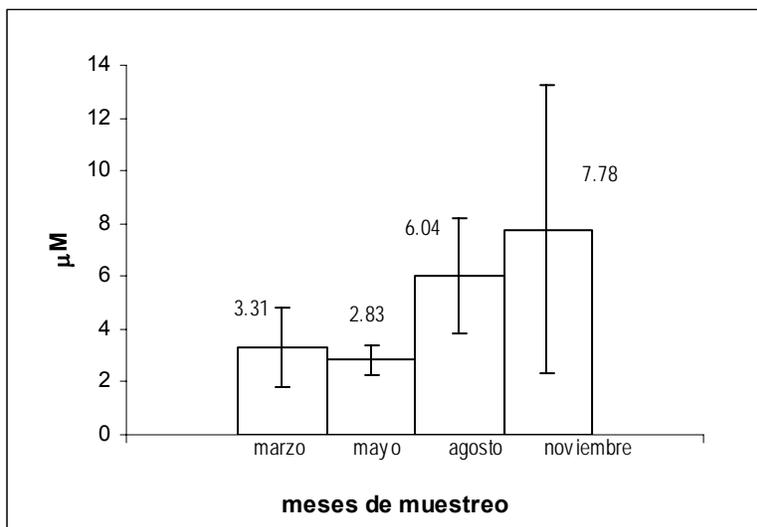


Fig. 25.- Fósforo total: valores promedio y desviación estándar (\pm)

En el caso de los ortofosfatos, una de las formas solubles de fósforo, las concentraciones representaron el 25 a 58% del fósforo total, con los más bajos niveles en mayo $0.99 \mu\text{M}$, $\text{DS} \pm 0.32$, época de sequía y los mas altos valores en agosto $2.26 \mu\text{M}$, $\text{DS} \pm 1.06$, época de lluvias (Fig. 26). En el mes de marzo se registro una alta correlación entre este parámetro y el fósforo total $r = 0.97$, $\alpha = 0.05$ (Tablas 6). Mientras que en noviembre se presento una alta correlación con los nitritos $r = 0.99$, $\alpha = 0.05$ (Tabla 9).

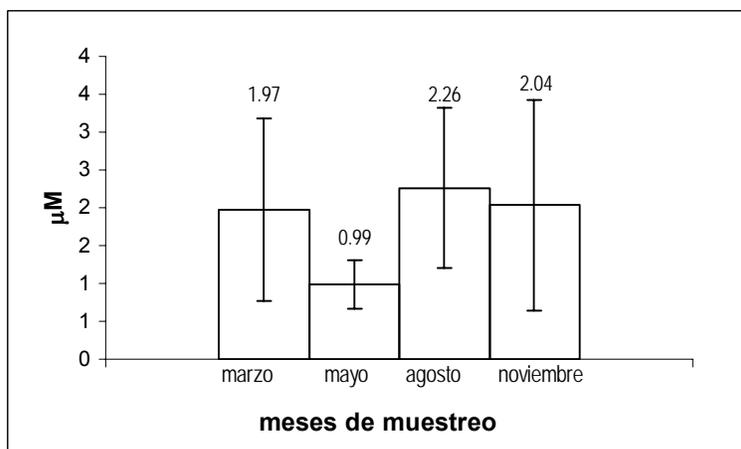


Fig. 26.- Ortofosfatos: valores promedio y desviación estándar (\pm)

Concentración de metales en agua

La concentración promedio de metales en agua en mayo y agosto estuvieron por debajo de las 2 ppm. Siendo el fierro (Fe) y el plomo (Pb) en agosto, de los más altos niveles con 1.05 ppm, $EE \pm 0.29$ y 0.73 ppm, $EE \pm 0.22$ respectivamente y en mayo el plomo alcanzó las 0.55 ppm, $EE \pm 0.22$. El orden de concentración de los metales en el mes de mayo fue $Pb > Fe > Ni > Cd > Zn > Cu$ y en el mes de agosto, el orden fue $Fe > Pb > Zn > Ni > Cu > Cd$ (Fig. 27).

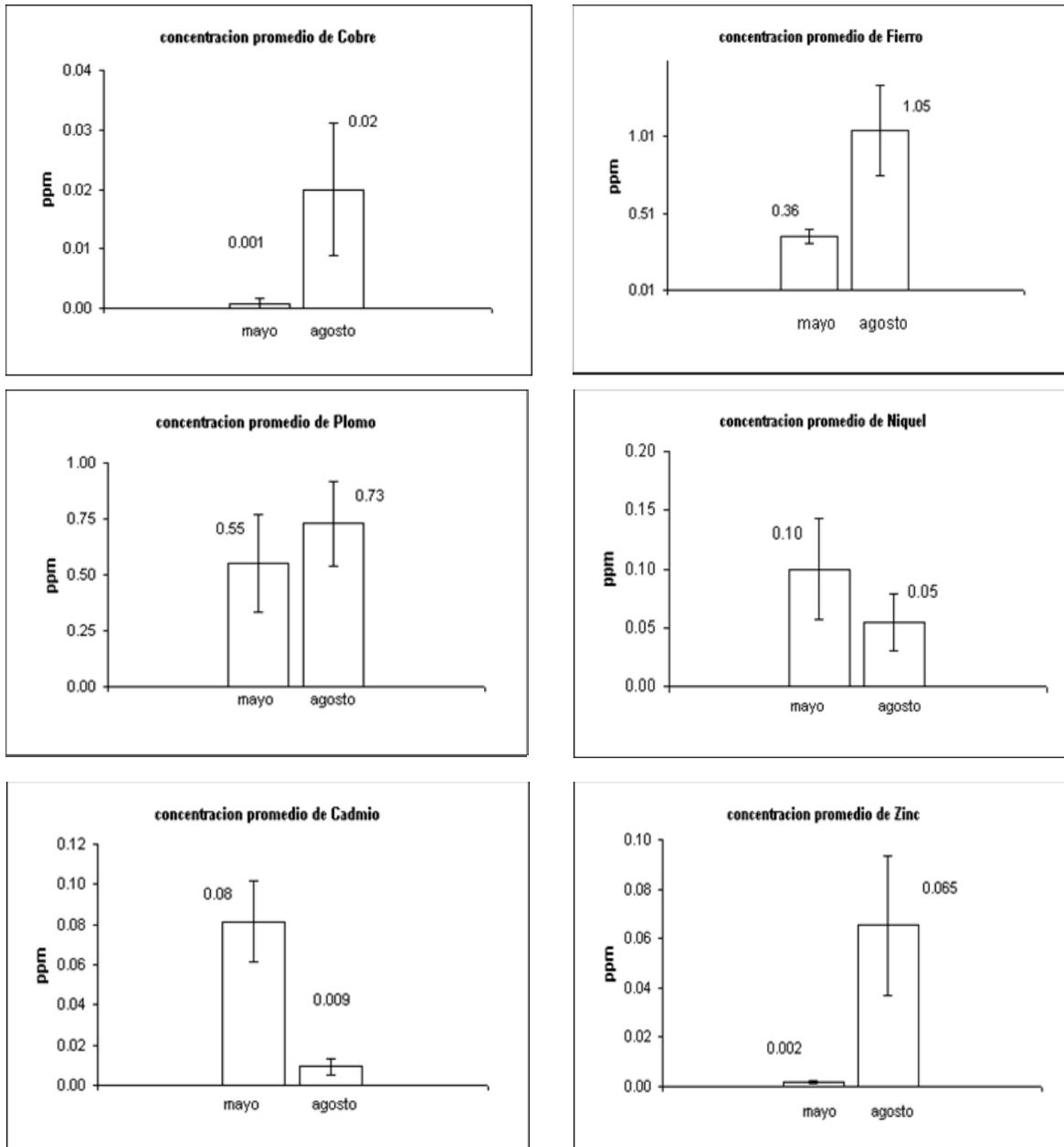


Figura 27.- Concentración promedio y error estándar (EE) de metales en el agua del Lago de Tecocomulco en los meses de mayo y agosto (época de secas y lluvias, respectivamente)

En la figura 28, se muestra la variación estacional en el contenido de metales en agua dentro del lago en los meses de mayo y agosto. En mayo el metal que registró las más altas concentraciones fue el plomo, ubicándose al suroeste en las estaciones 10 y 12, al sureste en la estación 13 y al noreste en la estación 15. En agosto el metal que registró las más altas concentraciones fue el plomo, ubicándose al suroeste en las estaciones 10 y 12, al sureste en la estación 13 y al noreste en la estación 15.

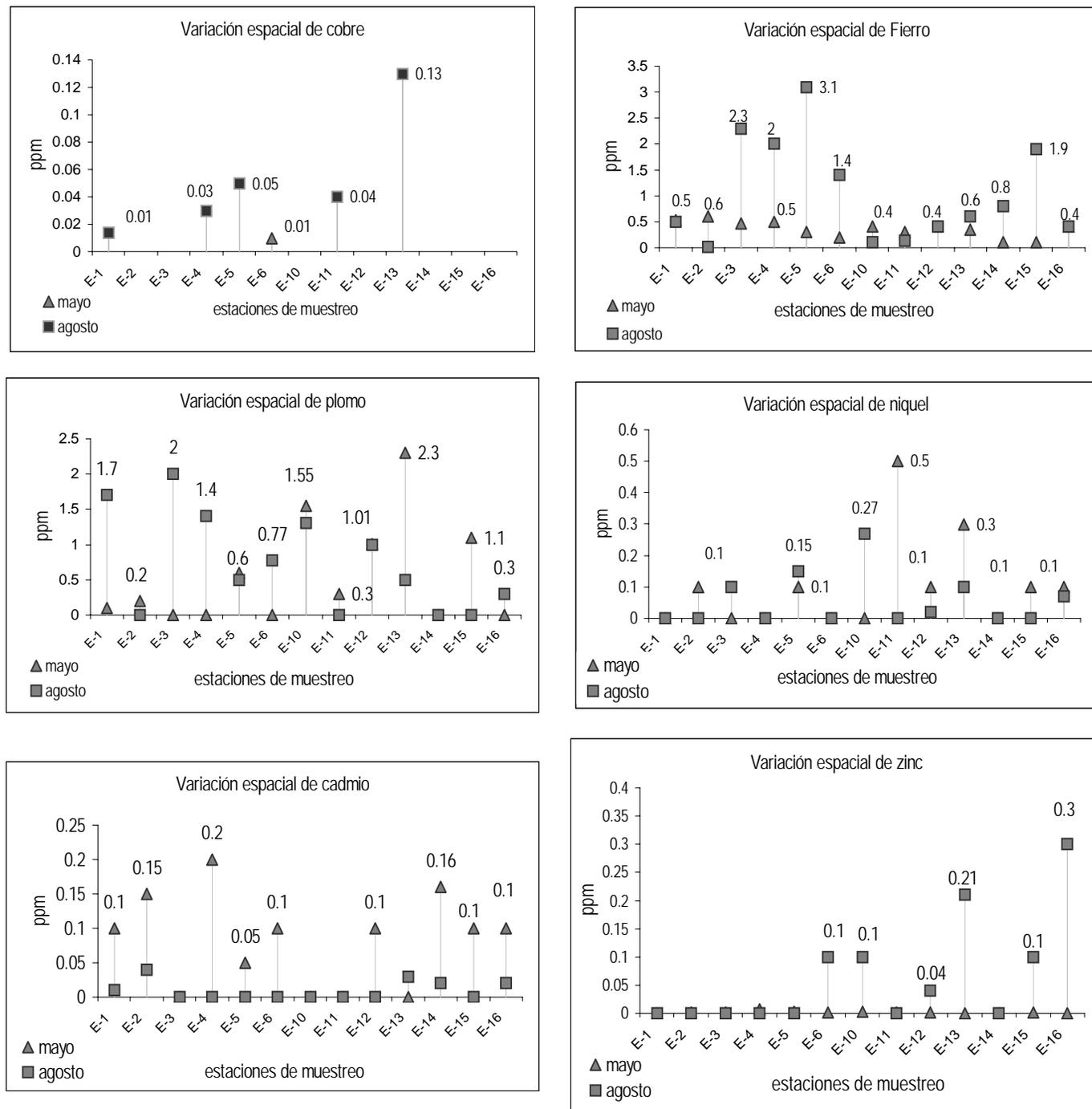


Fig. 28.- Contenido de metales en el agua de Tecocomulco en los meses de mayo y agosto.

Señalando los niveles altos por mes y estación de muestreo.

En el mes de agosto las concentraciones de fierro registraron los más altos niveles en un intervalo entre 1.90 y 3.10 ppm (Fig. 28), concentrados al suroeste en las estaciones 3, 4, 5, 6 y 12. Los niveles de plomo llegaron a alcanzar máximos en la zona suroeste correspondientes a las estaciones 1, 4 y 7 con niveles mayores de 1.3 ppm.

Concentración de metales en sedimento

Los niveles promedio de metales en sedimento del lago de Tecocomulco, estuvieron por debajo de las 40 ppm, siendo el Pb el metal que registró una mayor concentración de 29.23 ppm, $EE \pm 3.1$ seguido del Ni con 24.75 ppm, $EE \pm 1.4$, el Cr con 22.26 ppm, $EE \pm 1.8$, el Cu de 21.18 ppm, $EE \pm 1.5$ y con menor concentración el Cd con 3.80 ppm, $EE \pm 0.6$ (Fig. 29).

La distribución del contenido de metales en el sedimento del lago presentaron un comportamiento diferente al registrado en la columna de agua, especialmente el plomo que estuvo por arriba de las 30 ppm, mostrando mayores niveles en el centro y suroeste del lago correspondientes a las estaciones 1 y 3 cercanas al embarcadero; este mismo comportamiento lo presentó el cobre alcanzando niveles de 23 y 28 ppm; lo cual pueda deberse a que en este sitio se da mantenimiento a las lanchas de motor que se usan para los recorridos a los turistas en el lago. El níquel registró los más altos niveles de 31.38 ppm en el noroeste correspondiente a la estación 15, la cual es el punto limítrofe entre Cuauhtepic y Tepeapulco. Mientras que el cromo alcanzó sus mayores niveles al sur del lago en las estaciones 11 y 13 con más de 26 ppm. El cadmio fue un metal cuyas concentraciones no rebasaron las 6.12 ppm, registrándose al sur del lago en la estación 13 (Fig. 30).

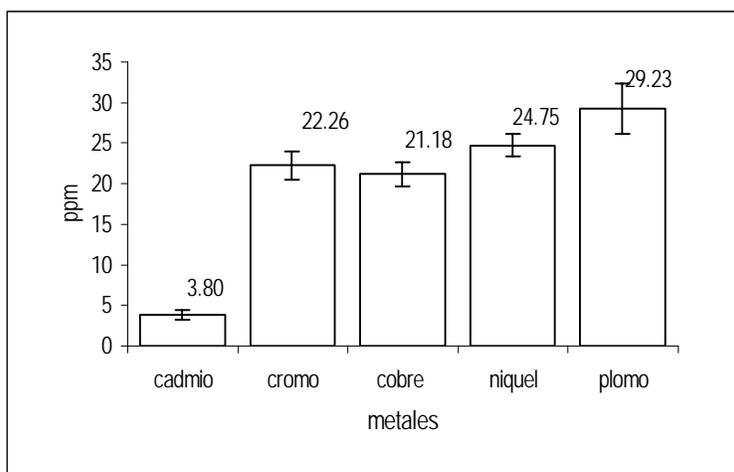


Fig. 29.- Concentración promedio y $\pm EE$ de metales en el sedimento del lago de Tecocomulco, en el mes de noviembre

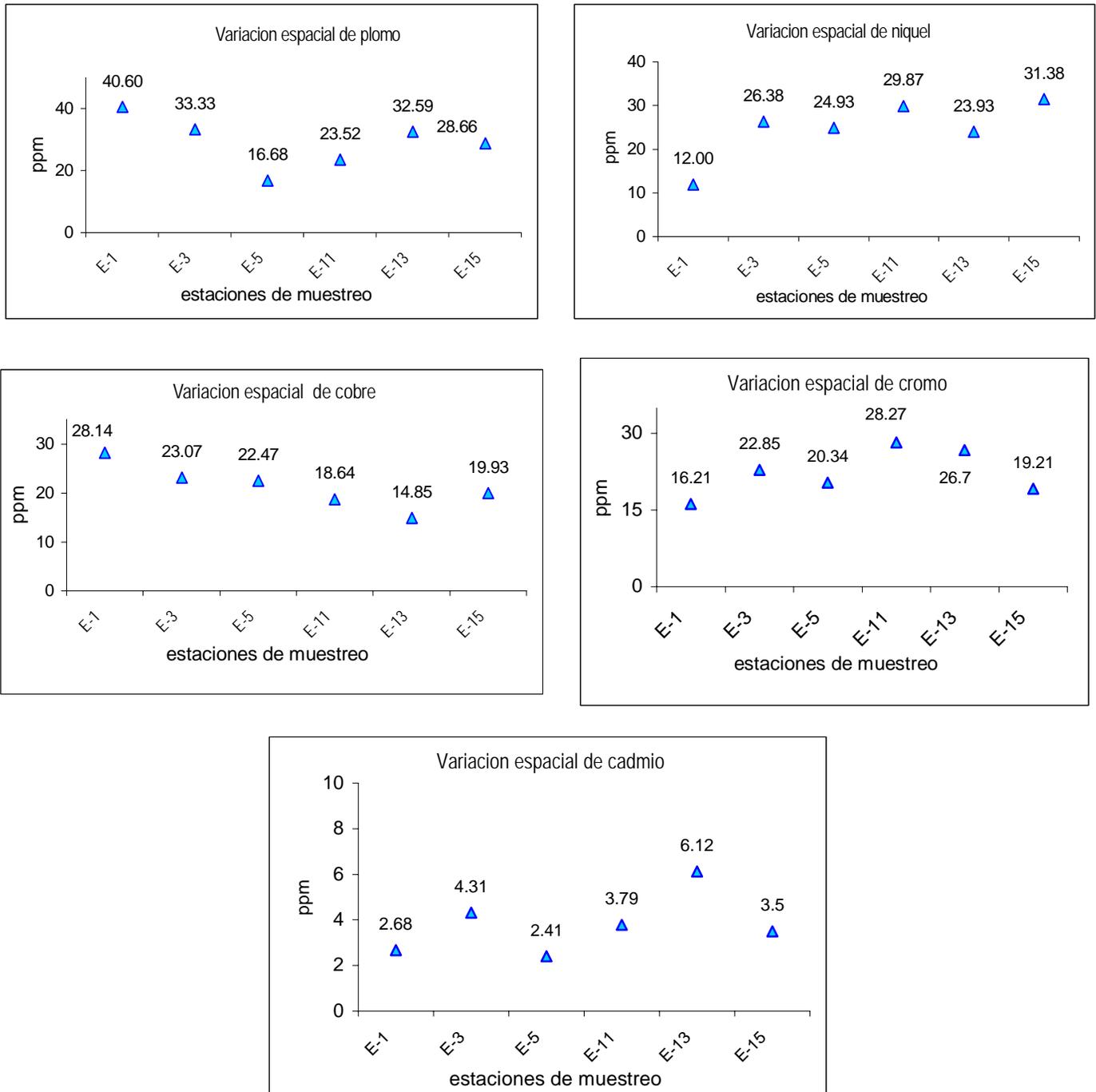


Fig. 30.- Variación espacial del contenido de metales en sedimento del lago de Tecocomulco. (noviembre)

Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos, Tecocomulco se considera como un lago somero con una profundidad promedio menor a los 2m, siendo el SE y SO las regiones más someras (Fig. 31), debido a que estas zonas son afectadas por la temporalidad y por el canal de Tultengo ubicado en esta zona del lago que provoca que las aguas descendan, aunado también a algunas bombas con las cuales se extrae agua con el propósito de disminuir el área inundada, tal y como fue observado por Ruiz (2000). Cabe mencionar que en los años de 1996 y 1997 casi no llovió, inclusive hasta antes de las lluvias de verano de 1998 por lo que el lago se secó casi en su totalidad (Ruiz, 2000). El estudio del lago en el año del 2002, mostró que en los meses de mayor precipitación de junio a septiembre, la profundidad y visibilidad al disco de Secchi promedio fueron menores a los registrados en los meses de poca precipitación de noviembre a marzo. Lo anterior se debe a que en época de lluvias los escurrimientos son mayores y aportan una gran cantidad de azolve que llega directamente al lago; lo cual está relacionado con el incremento de la superficie deforestada que retiene cada vez menos agua y por lo tanto se reduce el volumen de infiltración (Huizar et al, 2001). Además en esta época de lluvias los fuertes vientos del norte reportados por Gutiérrez et al. (2002) ocasionan, que los sólidos y lodos de fondo asciendan y se distribuyan en toda la columna de agua, como sucede en el lago de Cuitzeo (De la Lanza Espino y García Calderón, 2002), un lago poco profundo y con problemas de deforestación, erosión y azolve como Tecocomulco.

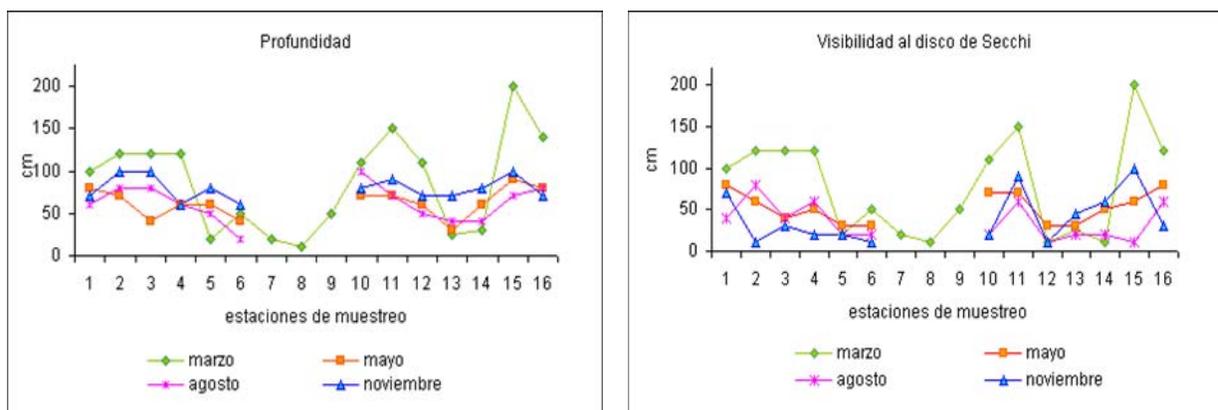


Fig. 31.- Variación estacional y temporal de la profundidad y visibilidad al disco de secchi en el lago de Tecocomulco

La zona NE representado por la estación 15 (Fig.31) presentó una mayor profundidad y visibilidad al disco de Secchi, que posiblemente y de acuerdo con lo citado por Jiménez y Juárez (2000), se debe a que durante la época de secas hay un flujo de agua permanente por la parte alta del río Tepozán y que desemboca a esta zona del lago.

El lago es de tipo polimíctico caliente continuo, según el modelo de Hutchinson y Loffler (1957) y de Lewis (1973) citados por Gutiérrez et al. (2002), al ser un lago somero y de latitud tropical con un periodo de ligera estratificación de mayo a julio, con la circulación favorecida en los meses de mayor precipitación pluvial y los vientos fuertes del norte (enero a julio). La temperatura de la columna de agua se encuentra fuertemente influenciada por cambios y fluctuaciones atmosféricas como la variación de la temperatura ambiental, registrándose en mayo las más altas temperaturas ambientales que se reflejaron en todas las estaciones de muestreo durante este mes (Fig. 32). Con la estación 15 ubicada al NE y la 13 al SE, mostraron una mayor temperatura, con un comportamiento diferente a las estaciones restantes (Fig. 32). Además la circulación que se vio favorecida por vientos fuertes y la precipitación pluvial en los meses de marzo y agosto, respectivamente, homogenizó la temperatura en todas las estaciones de muestreo. El Lago de Pátzcuaro Orbe y Acevedo (2002), y los embalses de Tlaxcala estudiados por Hernández (1999), mostraron un comportamiento polimíctico cálido continuo semejante, provocado por su poca profundidad y al encontrarse en latitud tropical. También los lagos de Metztlán en Hgo. (Ibáñez-Aguirre et al., 2002) y de Cuitzeo en Mich. (Chacón y Alvarado, 2002), presentan un comportamiento polimíctico provocado por fuertes vientos en el primero y a una circulación constante en el segundo.

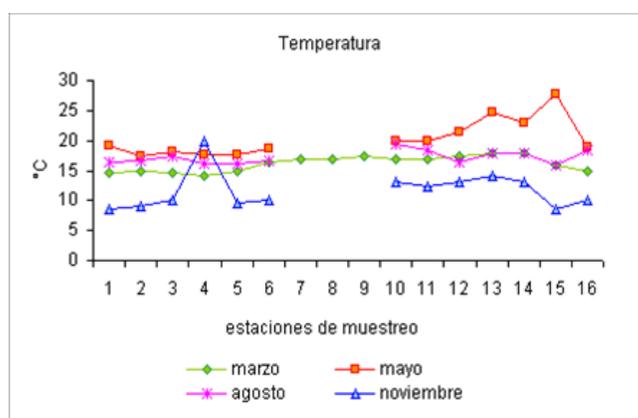


Fig. 32.- variación estacional y temporal de la temperatura

Los altos niveles de sólidos totales disueltos registrados en los meses de marzo y mayo, provenientes de fuentes difusas por la disolución y aporte de sedimentos que tienen lugar en los alrededores del lago y que contribuyen a su azolvamiento (Fig. 33), provocado posiblemente por la erosión eólica de los vientos fuertes del norte que ocurren durante enero a julio (Gutiérrez et al., 2002) que afecta las tierras de cultivo de temporal de las zonas del noroeste y suroeste y también por los escurrimientos superficiales que ocurren durante o inmediatamente después de los meses lluviosos (de mayo a octubre) y en los meses restantes el escurrimiento empieza a descender hasta que la mayoría de los escurrimientos se infiltran y evaporan (de enero a marzo) y solo se mantienen

algunos ríos permanentes: Cuautlaco (SE), Tepozán (NE) y Canoas (NO) (Ruiz, 2000), los cuales pueden estar aportando la mayoría de los sedimentos al desembocar en el lago. Además Ruiz (2000), registro que las zonas de lomeríos y laderas montañosas, al noreste de Tres Cabezas, al este y sur de Alcantarillas, la mayor parte del Cerro Blanco, al norte de Francisco Sarabia y al sur de Vista Hermosa se encuentran afectadas casi en su totalidad por la erosión, como consecuencia de las actividades inapropiadas de producción ahí realizadas. Además de la erosión, están las características geomorfológicas de la subcuenca como son los depósitos de toba, ceniza de caída no consolidada o ligeramente consolidada cuyo espesor varía de unos centímetros hasta algunos metros, que al desprenderse de su cobertura vegetal es fácilmente erosionada. Aunado a esto se encuentra la actividad de los pescadores que cortan el tule dejándolo pudrir dentro del cuerpo de agua provocando con ello una remineralización de los detritos como lo señala Hovhanissian (1998). Por lo que el mayor problema que refleja el lago es el azolvamiento, el cual se encuentra en un ritmo de 3.4 cm/m^2 y se calcula que de continuar así, en un máximo de 18 años el lago se puede azolvar por completo (Ruiz, 2000). En marzo la zona noreste concentró un mayor contenido de STD y en mayo en el lado noroeste, correspondientes respectivamente a las zonas de pie de monte y de laderas de montañas volcánicas, así como a los ríos que desembocan permanentemente en el lago.

La conductividad, fue baja y estuvo afectada por la temporalidad con concentraciones menores a los $600 \mu\text{S/cm}$, siendo mayo en la zona noreste la que presentó la mayor (Fig. 33), aunado con altas temperaturas; provocando con ello una concentración de sales minerales en el agua, aunado a una escasa precipitación y un exceso de evaporación. Estas mismas concentraciones se encuentran los lagos de Temascal en Oaxaca ($250 \mu\text{S/cm}$), de Zirahuén en Michoacán ($140 \mu\text{S/cm}$) y de Catemaco en Veracruz ($135 \mu\text{S/cm}$) (Torres- Orozco y García- Calderón, 1995).

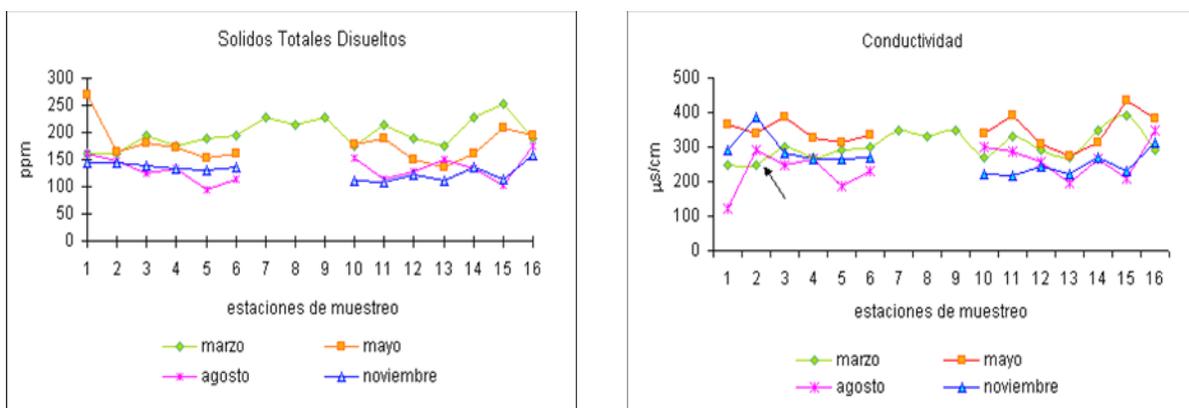


Fig. 33.- Variación estacional y temporal de los STD y la conductividad

El pH fue variable de neutro 6.99 en época de secas hasta alcalino 10.3 en época de lluvias (Fig. 16 y Fig. 34), que lo establece como una agua básica según Wetzel (1981), las variaciones de pH registradas se deben a los procesos fotosintéticos de las macrofitas acuáticas (Ángeles, 1986 y Marten, 1998). Además estos valores de pH son los mas adecuados para la producción de peces según Ellis (1937) citado por Ángeles (1986).

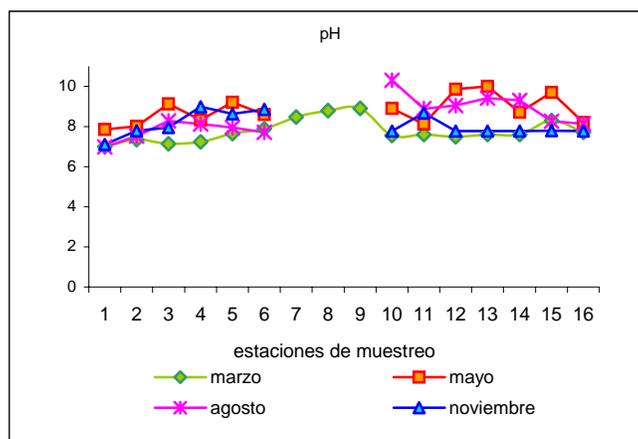


Fig. 34.- Variación estacional y temporal del pH

Gutiérrez et al. (2002) clasifica al lago de Tecocomulco como de alcalinidad media ya que en su estudio registro valores de 141 ± 40 mg/l CaCO_3 , coincidentes con este estudio. Boyd (1979) y Moyle (1945) citado por Ángeles (1986), establecen que cuando la alcalinidad es mayor a 40 mg/l CaCO_3 se trata de aguas duras, atributo que se asocia con ambientes productivos que permiten el crecimiento del plancton para el cultivo de peces. Las concentraciones promedio de dureza fluctuaron entre los 99 y 135 mg/l CaCO_3 , clasificadas como suaves o moderadamente duras y en ciertos meses como duras según la clasificación de Sawyer y McCarty (1967), citado en De la Lanza Espino et al. (1998) al alcanzar concentraciones de más de 170 mg/l CaCO_3 , como en noviembre (Fig. 35), debido a una movilización mas fácil del magnesio y del calcio al agua (Ángeles, 1986). Según Gutiérrez et al. (2002), si la alcalinidad es mayor que la dureza (marzo, mayo y agosto) implica que una parte de los iones bicarbonatos y carbonatos no están ligados a los iones calcio y magnesio, sino probablemente al sodio, lo cual explica los altos niveles de pH, por lo que muestra que la alcalinidad, pH y dureza del lago van ligadas de acuerdo a esos autores. Según Maya (2000) a un incremento de pH el calcio decrece y los cationes principales en solución son el magnesio y sodio y en ocasiones cantidades apreciables de potasio; por lo que la alcalinidad del agua debe estar siendo determinada por la disolución y mezcla de sales del suelo e incrementando probablemente por la acción del viento al acarrear partículas hacia el interior del cuerpo de agua y por la evaporación que produce un cambio de bicarbonatos a carbonatos. Para Brooks et al. (1991), los rangos de alcalinidad de 100 a 120 mg/l son de ambientes que pueden generar buenas

condiciones para la vida acuática, que en Tecocomulco solo se presentaron en noviembre y al SO y SE (estaciones 12, 13 y 14). Lo cual puede deberse a que en noviembre la situación que imperó fue la poca actividad agrícola y pesquera, por lo que la entrada, salida y resuspensión de los sedimentos se consideró sin perturbación significativa y que provocó que los valores de alcalinidad fueran menores a los registrados en los meses restantes (Fig. 17). En agosto, mes de alta precipitación se mostró una correlación significativa entre la conductividad, STD y la alcalinidad, ya que sus valores fueron los mas bajos comprados con la de otros meses y lo que deja de manifiesto la influencia de la época de lluvias en la zona y la dilución por ende de las sales que afecta los valores de estos parámetros, dicho comportamiento es muy parecido al reportado por Fuentes y Ramírez (2005) para el Lago de Guadalupe, el cual es un embalse en el estado de México considerado como una reserva ecológica y con alta incidencia de maleza acuática que ha provocado su deterioro. (Tabla 8).

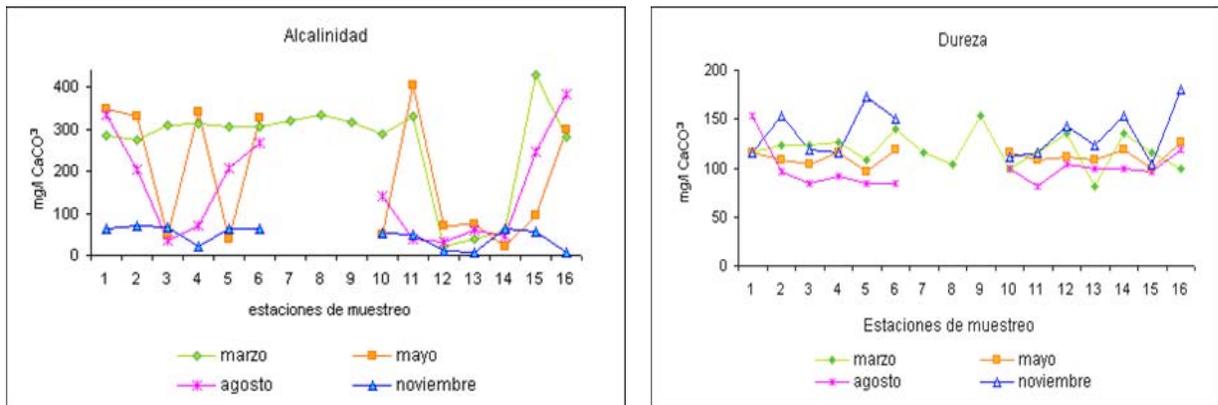


Fig. 35.- Variación estacional y temporal de la alcalinidad y la dureza.

Los valores de oxígeno disuelto promedio registrados fueron aproximadamente semejantes a los reportados por Gutiérrez et al. (2002), con un intervalo de 4.25 ± 2.03 mg/l en la superficie y de 3.10 ± 2.18 mg/l para el fondo, mientras que en el presente estudio las variaciones promedio oscilaron de 1.84 a 3.81 (Fig. 14) y sus contenidos variaron espacialmente de 0 a 7.8 mg/l (Fig. 36). Con base en lo anterior las aguas del lago van desde oxigenadas hasta la hipoxia e incluso la anoxia. En las zonas del SO y SE (estaciones 12, 13 y 14) fueron las mejores condiciones de oxigenación en el mes de marzo. El ambiente anóxico puede deberse a la descomposición de materia orgánica proveniente de las macrofitas acuáticas sumergidas y emergentes; además la roza, tumba y quema del tular que practican los pescadores y que generan su descomposición dentro del cuerpo de agua (Gutiérrez et al., 2002), incorporando una carga orgánica adicional al agua disminuyendo la concentración del oxígeno (Rangel, 1995). Además de que impide la mezcla de la columna de agua por el viento; el tular ocupa un 19% del cuerpo de agua con una extensión de 6.38 km^2 , estando los niveles de oxigenación por debajo de los 5 mg/l.

En el caso de la demanda química de oxígeno (DQO), de un promedio de 7.55 a 13.28 mg O₂/l (Fig. 20), con un intervalo de variación espacial y temporal de 6 a 15 mg O₂/l (Fig. 36), los máximos fueron en el mes de noviembre (Fig. 20) correlacionada de manera significativa con los STD con una $r = 0.74$ (Tabla 9) que pueden contener materiales orgánicos e inorgánicos consumidores de oxígeno. El mismo comportamiento se presentó en agosto donde la DQO manifestó una mediana y significativa correlación $r = 0.5$ con los STD (tabla 8); lo cual según Maya (2000), puede ser resultado de la influencia de los escurrimientos en épocas de lluvias por los ríos que llegan al lago vía Cuautlaco y Tepozán, así como por los lixiviados de las halofitas sumergidas o de tule derribado en este mes y noviembre, lo cual constituye una fuente importante de materia orgánica en descomposición.

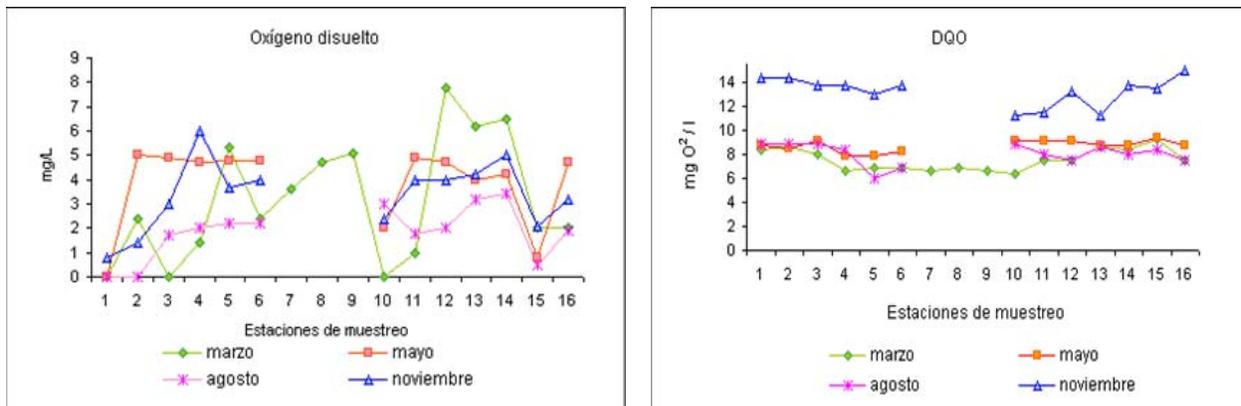


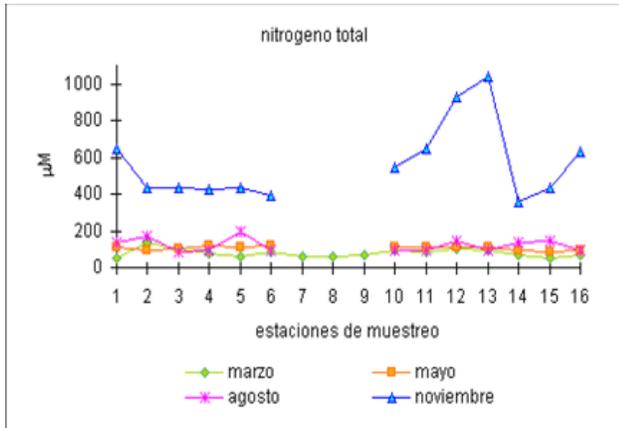
Fig. 36.- Variación temporal y estacional del OD y DQO

Maya (2000) señala que para cada lago, sea natural o artificial, las concentraciones tanto de nitrógeno como de fosfatos son variables, esto se debe a las condiciones climáticas, de drenaje, de productividad y de contaminación existentes en cada cuerpo de agua, por lo que la comparación con otros cuerpos de agua es difícil de establecer.

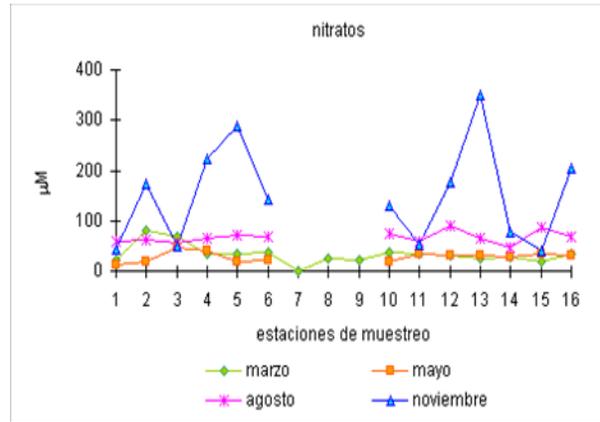
En el lago de Tecocomulco, los nutrientes mostraron contenidos promedios que se comportaron de manera decreciente nitrógeno total > NO₃ > fósforo total > NH₄ > PO₄ > NO₂-, durante todo el año de estudio,

En Tecocomulco se registraron en promedio concentraciones altas de nitrógeno total en un intervalo de 78 a 566.31 μM (Fig. 21) en el mes de noviembre y particularmente en las zonas del suroeste y sureste, con más de 925 μM (Fig. 37 a). Este alto nivel de nitrógeno total también fue registrado por Gutiérrez et al. (2002), donde el valor promedio máximo fue de 84 μM/l, mientras que para las restantes formas inorgánicas como los nitratos registraron contenidos promedio menores de 42.85 μM/l y los nitritos con niveles mucho menores de 1.4 μM/l. Para Tecocomulco los NO₃ representaron el 26 al 56 % del nitrógeno total con intervalos promedio de 28.10 a 150.20 μM; el

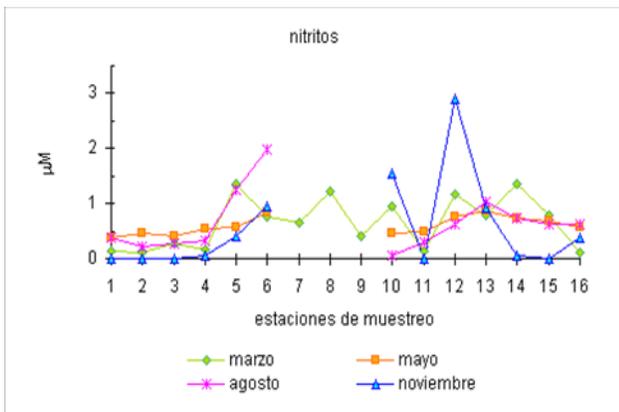
NH_4 con el 0.22 al 4.7 % y concentraciones de 1.25 a 5.65 μM y los NO_2 con el 0.10 al 0.86% y contenidos de 0.55 a 0.65 μM .



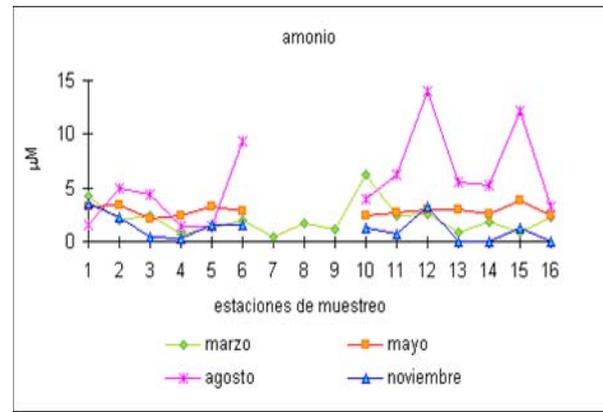
a)



b)



c)



d)

Fig. 37.- Variación espacial y temporal de las formas nitrogenadas:

a) nitrógeno total, b) nitratos, c) nitritos y d) amonio

El comportamiento de los nutrimentos para el mes de noviembre muestra que la zona suroeste estuvo más influenciada por las formas nitrogenadas como el nitrógeno total, los nitritos y por los ortofosfatos y el fósforo total y la zona sureste por el nitrógeno total y los nitratos; este comportamiento parecido al lago Nabor carrillo citado por Maya (2000), indica que en estas zonas hubo una mayor fijación del nitrógeno tanto en agua como en sedimento y una mayor entrada de drenaje superficial y subterráneo; así mismo estos aportes de nutrientes pueden deberse al arrastre de los fertilizantes nitrogenados utilizados en las zonas agrícolas adyacentes que los campesinos realizan para riego de sus cultivos (Mirror-globe, 2003).

Una gran proporción, más del 90%, del fósforo en aguas dulces se encuentran como fósforo orgánico y constituyentes celulares de la biota, mientras que los PO_4 son originados por la remineralización de detergentes sintéticos y coloides inorgánicos (Wetzel; 1981). De acuerdo con la clasificación citada por Wetzel (1981) y a lo citado por Gutiérrez et al. (2002), las concentraciones de fósforo total del lago de Tecocomulco lo clasifican como mesotrófico, comportamiento similar al observado en el lago de Pátzcuaro, el cual se encuentra en proceso de deterioro por la carga de sedimentos, aguas negras, fertilizantes y biocidas que se van acumulando ya que este lago se encuentra en una cuenca endorreica (Orbe y Acevedo, 2002), semejante a Tecocomulco. Las concentraciones de los ortofosfatos estuvieron entre un intervalo de 0.52 a 5.88 μM , reflejándose una mayor concentración en el mes de noviembre al suroeste y en marzo al noroeste y suroeste (Fig. 27 y 38).

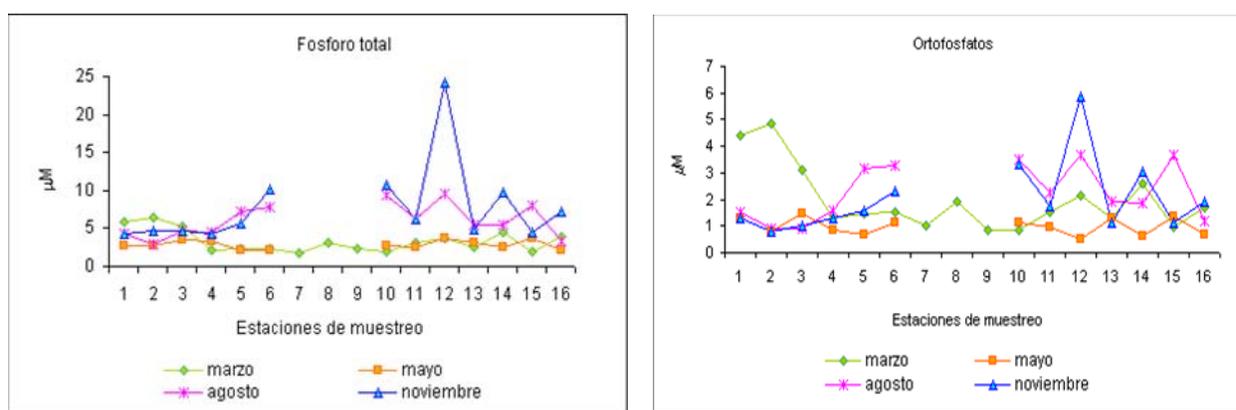


Fig. 38.- Variación espacial y temporal del fósforo total y ortofosfatos.

En el lago de Tecocomulco, las concentraciones de los metales traza en agua (Pb, Fe, Zn, Cd, Cu y Ni); fluctuaron en un intervalo de 0 a 3.10 ppm, mientras que en el sedimento las concentraciones fueron mayores de 2.41 a 40.6 ppm y su medición solo se realizó en noviembre que fue el mes que presentó una mayor concentración de nutrientes. Los metales traza se clasifican dentro de los elementos menores y son no conservativos. Su presencia en los cuerpos de agua se debe actualmente al incremento de las actividades humanas. La geoquímica de los metales es compleja y depende del tipo de elemento y del contenido de materia orgánica, así como de las condiciones de óxido - reducción que suceden, de los valores de pH que se alcanzan, y de la textura o la composición granulométrica del sedimento entre los factores más importantes (De la Lanza Espino; 1998). Tal vez estas condiciones fueron las que influyeron en las concentraciones de Pb y de Fe en agua, siendo en agosto el Fe, el metal que mostró los niveles altos favorecido por las escorrentías y drenajes de los ríos que alimentan al lago. En mayo el Pb alcanzó altos niveles y pudo deberse a que en el mes más cálido se incrementan las actividades eco turísticas de la zona y hay más movimiento de lanchas con motor que usan gasolina.

Conclusiones

La condición ambiental que prevalece en el Lago de Tecocomulco, señala cambios fisicoquímicos temporales extremos naturales, aunado a la serie de actividades antropogénicas y de fuentes de contaminación difusa que se suceden en sus alrededores como son la fuerte erosión de las laderas de los cerros, la presencia de las tierras de cultivo y de pastoreo y la alta cobertura así como la roza y tumba del tular; entre las cuales han favorecido la disminución de la profundidad, tanto en la temporada de secas como en la época de lluvias; la escasa visibilidad, las condiciones de anoxia en el mes de mayor precipitación y con la presencia del tular que evita una libre circulación del viento para favorecer la mezcla de agua. La gran erosión de la subcuenca se refleja en las concentraciones de alcalinidad, STD y conductividad, estos dos últimos importantes en la evaluación del rendimiento piscícola del lago. La dureza lo cataloga como de agua semidura. Los niveles de DQO manifiestan una carga de materia orgánica, atribuida a las escorrentías de los ríos que alimentan al lago así como a la actividad de roza y tumba que realizan los pescadores sobre el tular, provocando que éste se pudra en el agua. La alta densidad de vegetación que se encuentra tanto sumergida, emergente y flotante, tiene un papel importante al momento de definir los planes de manejo que tendrán que efectuarse para poder realizar la rehabilitación de este lago relicto de la cuenca de México. En cuanto a la variación de nutrimentos se registraron altas concentraciones de nitrógeno total y de los nitratos, influenciados por las actividades antropogénicas: drenaje de aguas residuales, uso de fertilizantes en los cultivos agrícolas. En tanto que los niveles de fósforo y de ortofosfatos clasifican al lago como un ambiente mesotrófico, que puede tender a la eutrofia si no se hace algo para desviar los drenajes de aguas negras provenientes de los poblados cercanos al lago.

La concentración de los metales traza aun no se encuentra influenciado por descargas industriales ni agrícolas, pero que será necesario contemplar y realizar monitoreos de estos elementos a fin de que su concentración no se vea incrementada, por las necesidades de desarrollo socioeconómico imperantes en la zona.

Bibliografía

1. Acevedo, S. O. A. 1996. Degradación y Contaminación de los Suelos del Estado de Hidalgo. Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.
2. Aladro, L.M. A. 2000 .Proyecto de Ciliados Epibiontes de la Vegetación sumergida y de los Invertebrados del Lago de Tecocomulco, Hidalgo. Laboratorio de Protozoología de la Universidad Nacional Autónoma de México. En: Jiménez, F. E. J. 2001. Estudios para la Conservación y Aprovechamiento Sustentable en la Subcuenca de Tecocomulco, Hidalgo. Memoria de la 1ª reunión de la comisión multidisciplinaria para la conservación del lago de Tecocomulco, Hidalgo, que se llevo a cabo el 7 y 8 de octubre de 2000. Sociedad Mexicana de Ornitología y Universidad Nacional Autónoma de México. Primera edición, México.
3. A.P.H.A., WWA- APCF.1994. Standard Methods for the Examination Water & Waste Water. American Poblacion Healthing. H.A.L.T.H. Assoc. Washington.
4. Arredondo F. J. L., Vera, M. O., y Ortiz, L. A. O. 1984. Análisis de componentes principales y cúmulo de datos limnológicos, en el lago de Alchichica , Puebla. BIOTICA 9 (1): 23-39.
5. Avalos, V. S. y Román, H. E. 2000. Estudio de la Vegetación de la Cuenca de Tecocomulco. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. En: Jiménez, F. E. J. 2001. Estudios para la Conservación y Aprovechamiento Sustentable en la Subcuenca de Tecocomulco, Hidalgo. Memoria de la 1ª reunión de la comisión multidisciplinaria para la conservación del lago de Tecocomulco, Hidalgo, que se llevo a cabo el 7 y 8 de octubre de 2000. Sociedad Mexicana de Ornitología y Universidad Nacional Autónoma de México. Primera edición, México.
6. Banderas T., G. A. 1994. Limnología del Lago el Sol, Nevado de Toluca, México. Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.
7. Boyd, C. E. 1979. Water quality in warm water fish ponds. Auburn University Auburn. 354 pp.
8. Brooks, N. K.; Ffolliott, F.P.; Gregersen, H.H. y De Bano, F.L. 1991. Hydrobiology and the Management of Watershed. 2a ed. Iowa. State University Press Ames.

9. Caballero, M., Lozano, S., Ortega, B., Urrutia, J. Y Macias, J L. 1999. Environmental characteristics of lake Tecocomulco northern basin of Mexico for the last 50,000 years. *Journal Paleontology*. 22:399-411.
10. CONABIO. Accesible en: <http://www.conabio.gob.mx/pdf/ep/epcomienzo.html>. Consultada en el 2002.
11. CONANP, 2003. Criterios RAMSAR para la inclusión de Tecocomulco como humedal de gran importancia y para su declaración como área natural protegida. Accesible en: . <http://conanp.gob.mx/sig/anps/ramsar/lagtecoco.htm>.
12. CONAPO, PROGRESA (Programa de Educación Salud y Alimentación).1999. Atlas demográfico de México. México.
13. Consejo Estatal de Ecología de Hidalgo. 2001. Ordenamiento ecológico territorial del estado de Hidalgo. Periódico oficial. Gobierno del estado de Hidalgo. México.
14. Chacón, T. A. Y Alvarado, D. J. 2002. El lago de Cuitzeo. En: De la Lanza Espino. G. y García Calderón, J. L. 2002. Lagos y Presas de México. AGT EDITOR. México
15. Chávez, O.L.M. 1981. Implantación de un Policultivo en Estanques en un Medio Rural en Tecocomulco, Hidalgo. Tesis Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.
16. De la Lanza E. G., Sánchez, S. N. y Esquivel, H. A. 1998. Análisis temporal y espacial fisicoquímico de una laguna tropical a través del análisis multivariado. *Hidrobiologica* 8(2):89-96.
17. De la Lanza E. G., 1998, citado por Martínez, C. L. R. en *Ecología de los sistemas acuícola*. AGT editor. México. 230 pp
18. De la Lanza Espino. G. y García Calderón, J. L. 2002. Lagos y Presas de México. AGT EDITOR. México.
19. EPA 2000. accesible en: <http://www.epa.gov/owow/wetlands/restore/principles.html>).

20. FAO-UNESCO,1985. Classification of soil.
21. Espinosa, P. G. 1996. El embrujo del Lago: El Sistema Lacustre de la Cuenca de México en la Cosmovisión Mexica. Serie histórica de la ciencia y la tecnología /7. Universidad Nacional Autónoma de México.
22. Fuentes C. F. y Ramírez, C.V. 2005. Análisis fisicoquímicos del Lago de Guadalupe. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán . UNAM
23. García, E. 1973. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köpen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México
24. Giersberg, R.M., Elkins, V.B., Lyon S.R. y Goldam, L. 1986. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands. *Water Research* 20 (3):363-368
25. Granados, S. D., Germán, H. R. y López, R. G. F. 2000. Vegetación de la Cuenca de Tecocomulco, Hidalgo. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
26. Gutiérrez, Z. R. M. Cabrera, M. E. , Bermúdez, R. E. A., Pérez, V. P. A. 2002. Lago de Tecocomulco, Hidalgo. En: Pérez, V. P.A., Cruz, S. L. E., Bermúdez, R. E. A., Cabrera, M. E. , Bermúdez y Gutiérrez, Z. R. M. Eds. 2002. Pesquerías en tres cuerpos de agua continentales de México. Instituto Nacional de Pesca. SAGARPA. México. 168pp.
27. Guillette, B. 1992. The green revolution in wastewater treatment. *Biocycle* 12:44-48
28. Hasler, A.D. and Jones, E., 1949. Demonstration of the antagonistic action of large aquatic plants on algae and rotifers. *Ecology* 30, pp. 346-359.
29. Hernández, A. J. S. 1999. Limnología de Pequeños Embalses en el Estado de Tlaxcala. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México
30. Hernández, P. J. J. 2003. Análisis de la Migración en el Municipio de Cuauhtepic de Hinojosa, Hidalgo y Realización de un Estudio de Campo. Tesis licenciatura. Escuela de Estudios Profesionales Acatlan. Universidad Nacional Autónoma de México.

31. Huizar, A. R., Campos, E, J. O., Lermo, S. J., Delgado, R.O. y Huidobro, G. A. 1997. Geophysical and Hidrogeological characterization of the sub-basins of Apan and Tochac (Mexico Basin). *Geofísica internacional* 36 (4): 217-233.
32. Huizar, A. R., Campos, E. O. y Salazar M. L.M. 2001. Evaluación Hidrogeológica de la subcuenca de Tecocomulco, estados de Hgo., Pue. Y Tlax., México. En: Jiménez, F. E. J. Eds. Estudios para la Conservación y Aprovechamiento Sustentable en la Subcuenca de Tecocomulco, Hidalgo. Memoria de la 1ª reunión de la comisión multidisciplinaria para la conservación del lago de Tecocomulco, Hidalgo, que se llevo a cabo el 7 y 8 de octubre de 2000. Sociedad Mexicana de Ornitología y Universidad Nacional Autónoma de México. Primera edición, México
33. Huizar, A.R., De la Lanza, E. G., Ruiz, E. J. Hernández, P. S. y López, R. V. 2004. Azolvamiento del lago de Tecocomulco, México, por cambios en el uso del suelo no planificado (una propuesta de manejo). (en proceso de publicación).
34. Hutchinson, G. E. y Löffler. H. 1956. The termal calssification of lakes. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 42:84-86.
35. Ibáñez-Aguirre, A. L. , García, C. J. L. , Pérez, R. A. , Álvarez, H. S., Álvarez, S. C. y Núñez, P. E. 2002. El lago de Metztlán, Hidalgo. En: De la Lanza Espino. G. y García Calderón, J. L. 2002. Lagos y Presas de México. AGT EDITOR. México
36. INE. 2001. Evaluación ambiental comparativa de dos sitios de considerados para la ubicación del nuevo aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Accesible en: <http://www.ine.gob.mx/indexaero.html>.
37. INEGI. 1994. Apan, Estado de Hidalgo. Cuadernos estadístico municipal, gobierno del estado de hidalgo, Ayuntamiento Constitucional Apan. INEGI
38. INEGI a. 1995. Cuaderno estadístico municipal Cuautepec Hinojosa, Hidalgo. Gobierno del estado de Hidalgo. Ayuntamiento constitucional de Cuautepec Hinojosa. INEGI
39. INEGI b. 1995. Tepeapulco. Estado de Hidalgo. Cuadernos estadístico municipal, gobierno del estado de hidalgo, Ayuntamiento Constitucional. Tepeapulco. INEGI

40. INEGI c. 1995. Carta topográfica, Ciudad Sahagun E14B12. Hidalgo y México. Escala 1:50 000. México. D.F. Secretaria de programación y presupuesto. INEGI.
41. INEGI. 2002. Anuario estadístico del estado de Hidalgo. México. INEGI
42. INEGI – SIMBAD. 1998. Estadísticas Vitales. México. INEGI
43. Jiménez, F. E. J. y Juárez, L. J.C. 1996. Resumen de proposiciones para la conservación y el aprovechamiento integral del lago de Tecocomulco. Laboratorio de vertebrados terrestres. Departamento de Biología. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.
44. Jiménez, F. E. Y Juárez. 2000. Guía para las Expediciones del Taller de Fauna Silvestre y Acuática del Neártico y Neotropical al Lago de Tecocomulco, Hgo. Relicto Ecológico de la Cuenca de México. Cuaderno 26. Taller de Fauna Silvestre y Acuática del Neártico y Neotropical. Lab. De Vertebrados Terrestres Dep. de Biología, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Sociedad Mexicana de Ornitología A.C.
45. Jiménez, F. E. J. 2001. Estudios para la Conservación y Aprovechamiento Sustentable en la Subcuenca de Tecocomulco, Hidalgo. Memoria de la 1ª reunión de la comisión multidisciplinaria para la conservación del lago de Tecocomulco, Hidalgo, que se llevo a cabo el 7 y 8 de octubre de 2000. Sociedad Mexicana de Ornitología y Universidad Nacional Autónoma de México. Primera edición, México. 201 pp.
46. Lagarde, S. R L. R. 1992. Estudio hidrogeológico de la cuenca de Tecocomulco, Estado de Hidalgo. Tesis Licenciatura. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
47. <http://www.lenntech.com/espanol/FAQ-contaminacion-agua.htm>, 2003
48. Lot, H. A. 1978. Fanerógamas Acuáticas del Lago de Tecocomulco, Hidalgo. Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México.
49. Lot H., A. 1995. Flora Acuática del Valle de México. Texto para el calendario 1995. Jardín Botánico. Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México.

50. Lot, H. A. y Novelo, R. A. 1978. Guía Botánica de Excursiones en México. Laguna de Tecocomulco en México. Sociedad Botánica de México A.C. México.
51. Marten, S. 1998. Ecology of shallow lakes. Chapman & may. London, N.Y., Tokio. 357 pp.
52. Maya, R. C. 2000. Modificación de la calidad fisicoquímica y microbiológica de los efluentes de agua tratada por su embalse en el lago de Nabor Carrillo. Tesis de Maestría en Ciencias. Posgrado de ciencias del mar y limnología. Universidad Nacional Autónoma de México.
53. Mejia, R. A. 1986. Regionalización Geográfico- Económica del estado de Hidalgo. Tesis de licenciatura geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México.
54. Mirror-globe. 2003. accesible en: <http://mirror.globe-germany.de/sda-bin/wt/ghp>.
55. Muñoz, S. J.C. 2003. Humedales como una Alternativa en el Tratamiento de Agua. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México.
56. Nobelo, E., Montejano, G. Cantoral, E. y Tavera, R. 2000. Las algas de la Laguna de Tecocomulco. Citado en: Jiménez, F, E. J. y Juárez, L. J.C. 2001. Primera reunión de la comisión interinstitucional para la conservación del Lago de Tecocomulco. Recopilación de publicaciones sobre el lago de Tecocomulco. Pachuca. México. 7 y 8 de octubre de 2000. inédito.
57. Orbe, M. A. y Acevedo, G. J. 2002. El Lago de Pátzcuaro. Citado por De la Lanza Espino. G. y García Calderón, J. L. 2002. Lagos y Presas de México. AGT EDITOR. México
58. Rangel, M. R. 1995. Diagnostico de Malezas Acuáticas y su Control en México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.
59. Rodarte, G.R., 1986. Geografía Rural del Municipio de Tepeapulco, Hgo. Tesis de licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
60. Rodarte, G. M. E. 1992.Importancia Ecológica y Etnobotánica de las especies arvenses en los agroecosistemas de temporal en el municipio de Tepeapulco, Hidalgo. Tesis de

- licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
61. Rodríguez, B.M. 1989. Ciclos Reproductivos y Alimenticios de *Rana montezumae* Baird 1854 (Amphibia: Anura) del Lago de Tecocomulco. Tesis Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.
 62. Ruiz, G. E. J. 2000. Evaluación de la Erosión en la Subcuenca de Tecocomulco. Estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala, México. Tesis de Licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México.
 63. SAG. 1976. Inventario Forestal del Estado de Hidalgo. Secretaria de Agricultura y Ganadería. Subsecretaria forestal y de la fauna. Publicación num. 39. México.
 64. Samecka, C. A. and Kempers, J.A. 2001. Concentrations of heavy metals and plant nutrients in water, sediments and aquatic macrophytes of anthropogenic lakes (former open cut brown coal mines) differing in stage of acidification. *The Science of the Total Environment*. 281(1): 87-98. accessible en: www.elsevier.com/locate/scitotenv
 65. Scheffer, M., 1998. *Ecology of Shallow Lakes*. Chapman & Hall, London.
 66. Secretaria de Recursos Hidráulicos (SRH). 1972. Boletín hidrológico numero 24. datos diarios del valle de México correspondientes al año 1971. México: SRH. Comisión hidrológica de la cuenca del valle de México.
 67. SER (Society for Ecological Restoration). 1999. Accesible en: <http://www.ser.org/definitions.html>
 68. SEMARNAP. 1997. Diagnostico socioeconómico y pesquero del lago de Tecocomulco. Delegación federal de Hidalgo. Subdelegación de Recursos Naturales. Pachuca. Hidalgo. México.
 69. SEMARNAP. 2000. Gestión Ambiental. SEMARNAP. México.
 70. SEMARNAT. 2001. Disco compacto con la información del Foto de satélite del lago de Tecocomulco.

71. Toledo, V.M., Carabias, J., Toledo, C. Y González, P. C. 1989. La Producción Rural En México: Alternativas Ecológicas. Prensas de Ciencias y Fundación Universo Veintiuno. México.
72. Torres, Orozco, R. y García, C. J. L. 1995. Introducción al Manejo de Datos limnológicos. Universidad Autónoma Metropolitana. Iztapalapa. México.
73. Van Ness, H. E. ,Scheffer M. , Van den Berg M. S. and Coops H. 2002. Aquatic macrophytes: restore, eradicate or is there a compromise?. *Aquatic Botany*. 2(3-4): 387-403
74. Vázquez Y., C. y Orozco, S. A.: 2000. La destrucción de la naturaleza. Serie 50 obras de divulgación científica de interés general . Fondo de Cultura Económica. ILCE.. México.
75. Vilchis, A. D.R., Campos, E. J.O., Huizar, A. R., y Marines, C.R. 2000. La estructura de la subcuenca de Tecocomulco (Noreste de la cuenca de México). Citado en: Jiménez, F, E. J. y Juárez, L. J.C. 2001. Primera reunión de la comisión interinstitucional para la conservación del Lago de Tecocomulco. Recopilación de publicaciones sobre el lago de Tecocomulco. Pachuca. México. 7 y 8 de octubre de 2000. inédito.
76. Wetzel, R. G. 1981. *Limnology*. 2a ed. Saunders College publishing. Philadelphia, NY.

ANEXO

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EVALUADOS EN EL LAGO DE TECOCOMULCO

	Profundidad (cm)	Temperatura (°c)	Visibilidad al disco de Secchi (cm)	Conductividad (µS/cm)	OD (mg/l)	pH	STD (ppm)	N-Total µM	NH ⁴ µM	NO ² µM	NO ³ µM	PO ⁴ µM	P-Total µM	DQO mg O ₂ /l	Dureza mg/CaCO ₃	Alcalinidad mg/CaCO ₃
MARZO																
media	85.94	16.22	77.19	305.00	3.15	7.77	198.25	78.20	2.06	0.65	33.22	1.97	3.31	7.55	118.10	263.63
desv. estándar	57.02	1.35	59.78	40.82	2.51	0.57	26.54	23.53	1.46	0.47	18.79	1.20	1.48	0.90	17.89	116.56
error estándar	14.25	0.34	14.94	10.21	0.63	0.14	6.63	5.88	0.37	0.12	4.70	0.30	0.37	0.22	4.47	29.14
v.max	200.00	18.00	200.00	390.00	7.80	8.90	253.50	135.63	6.27	1.37	82.03	4.83	6.49	9.22	153.84	430.00
v.min	10.00	14.00	10.00	250.00	0.00	7.00	162.50	48.13	0.44	0.11	1.09	0.86	1.82	6.34	80.77	20.00
MAYO																
media	62.31	20.33	52.31	346.15	3.81	8.82	178.00	104.92	2.86	0.60	28.10	0.99	2.83	8.72	111.24	188.00
desv estándar	17.39	3.13	19.22	43.98	1.71	0.72	34.01	11.33	0.48	0.17	9.95	0.32	0.56	0.46	8.52	150.82
error estándar	4.83	0.87	5.34	12.22	0.48	0.20	9.45	3.15	0.13	0.05	2.76	0.09	0.16	0.13	2.37	41.90
v.max	90.00	27.70	80.00	435.00	5.00	10.00	269.00	123.59	3.83	0.88	47.03	1.47	3.74	9.36	126.92	404.00
v.min	30.00	17.30	30.00	272.00	0.00	7.86	135.00	87.50	2.13	0.38	10.94	0.52	2.11	7.92	96.15	20.00

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EVALUADOS EN EL LAGO DE TECOCOMULCO

	Profundidad (cm)	Temperatura (°c)	Visibilidad al disco de Secchi (cm)	Conductividad (µS/cm)	OD (mg/l)	pH	STD (ppm)	N-Total µM	NH ⁴ µM	NO ² µM	NO ³ µM	PO ⁴ µM	P-Total µM	DQO mg O ₂ /l	Dureza mg/CaCO ₃	Alcalinidad mg/CaCO ₃
AGOSTO																
media	61.54	17.20	35.38	247.38	1.84	8.46	133.23	120.09	5.65	0.65	67.31	2.26	6.04	8.09	99.70	158.77
desv. estándar	21.54	1.09	22.95	58.62	1.10	0.90	22.90	35.39	3.97	0.52	11.99	1.06	2.19	0.89	19.26	123.21
error estándar	5.98	0.30	6.38	16.28	0.31	0.25	6.36	13.99	0.54	0.12	7.02	0.38	0.53	1.14	16.15	43.01
v. max	100.00	19.30	80.00	348.00	3.40	10.30	174.00	193.59	14.05	1.98	90.78	3.68	9.59	8.93	153.84	382.00
v.min	20.00	16.00	10.00	121.00	0.00	6.99	95.00	87.50	1.38	0.05	47.03	0.92	2.92	6.04	80.77	30.00
NOVIEMBRE																
media	79.23	11.64	39.62	267.46	3.37	8.05	129.54	566.31	1.25	0.55	150.20	2.04	7.78	13.28	135.20	46.00
desv. estándar	14.41	3.14	30.99	45.81	1.44	0.55	15.42	211.60	1.21	0.86	99.24	1.39	5.46	1.24	25.16	24.85
error estándar	4.00	0.87	8.61	12.72	0.40	0.15	4.28	58.78	0.33	0.24	27.57	0.39	1.52	0.34	6.99	6.90
v.max.	100.00	19.80	100.00	385.00	6.00	8.98	157.00	1039.06	3.51	2.91	350.00	5.88	24.23	15.00	180.76	72.00
v.min.	60.00	8.50	10.00	217.00	0.80	7.11	108.00	356.56	0.00	0.00	39.38	0.78	4.36	11.20	103.84	6.00