



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

CONTRIBUCION AL CONOCIMIENTO DE LA CALIDAD DEL  
AGUA EN DIFERENTES CORRIENTES SUPERFICIALES DEL  
PARQUE NACIONAL IZTA-POPO Y SU ZONA DE INFLUENCIA

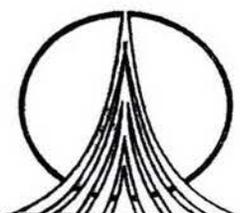
**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
B I O L O G O  
P R E S E N T A N :

**DE ANDA HURTADO PATRICIA**

**MIRANDA HERRERA GLORIA PATRICIA**

DIRECTORA DE TESIS:  
BIOL. ELOISA ADRIANA GUERRA HERNANDEZ



Unidad en la Diversidad:  
Zaragoza Frente al Siglo XXI

MEXICO D.F., NOVIEMBRE DE 2004



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.

## La Leyenda de los Volcanes

Las huestes del Imperio azteca regresaban de la guerra.

Pero no sonaban ni los teponaxtles ni las caracolas, ni el huéhuatl hacía rebotar sus percusiones en las calles y en los templos. Tampoco las chirimias esparcían su aflautado tono en el vasto valle del Anáhuac y sobre el verdiazul espejeante de los cinco lagos (Chalco, Xochimilco, Texcoco, Ecatepec y Tzompanco) se reflejaba un menguado ejército en derrota. El caballero águila, el caballero tigre y el que se decía capitán coyote traían sus rodela rotas y los penachos destrozados y las ropas tremolando al viento en jirones ensangrentados.

Allá en los cúes y en las fortalezas de paso estaban apagados los braseros y vacíos de tlecáxtil que era el sahumerio ceremonial, los enormes pebeteros de barro con la horrible figura de Texcatlipoca el dios cojo de la guerra. Los estandares recogidos y el consejo de los Yopica que eran los viejos y sabios maestros del arte de la estrategia, aguardaban ansiosos la llegada de los guerreros para oír de sus propios labios la explicación de su vergonzosa derrota.

Hacia largo tiempo que un grande y bien armando contingente de guerreros aztecas había salido en son de conquista a las tierras del Sur, allá en donde moraban los Ulmecas, los Xicalanca, los Zapotecas y los Vixtotis a quienes era preciso ungrir al ya enorme señorío del Anáhuac. Dos ciclos lunares habían transcurrido y se pensaba ya en un asentamiento de conquista, sin embargo ahora regresaban los guerreros abatidos y llenos de vergüenza.

Durante dos lunas habían luchado con denuedo, sin dar ni pedir tregua alguna, pero a pesar de su valiente lucha y sus conocimientos de guerra aprendidos en el Calmecac, que era así llamada la Academia de la Guerra, volvían diezmadados, con las mazas rotas, las macanas desdentadas, maltrechos los escudos aunque ensangrentados con la sangre de sus enemigos.

Venía al frente de esta hueste triste y desencantada, un guerrero azteca que a pesar de las desgarraduras de sus ropas y del revuelto penacho de plumas multicolores, conservaba su gallardía, su altivez y el orgullo de su estirpe.

Ocultaban los hombres sus rostros embijados y las mujeres lloraban y corrían a esconder a sus hijos para que no fueran testigos de aquel retorno deshonroso.

Sólo una mujer no lloraba, atónita miraba con asombro al bizarro guerrero azteca que con su talante altivo y ojo sereno quería demostrar que había luchado y perdido en buena lid contra un abrumador número de hombres de las razas del Sur.

La mujer palideció y su rostro se tornó blanco como el lirio de los lagos, al sentir la mirada del guerrero azteca que clavó en ella sus ojos vivaces, oscuros. Y Xochiquétzal, que así se llamaba la mujer y que quiere decir hermosa flor, sintió que se marchitaba de improvisó, porque aquel guerrero azteca era su amado y le había jurado amor eterno.

Se revolvió furiosa Xichoquétzal para ver con odio profundo al tlaxcalteca que la había hecho su esposa una semana antes, jurándole y llenándola de engaños diciéndole que el guerrero azteca, su dulce amado, había caído muerto en la guerra contra los zapotecas.

—¡Me has mentido, hombre vil y más porzoñoso que el mismo Tzompétlatl, - que así se llama el escorpión-; me has engañado para poder casarte conmigo. Pero yo no te amo porque siempre lo he amado a él y él ha regresado y seguiré amándolo para siempre!

Xochiquétzal lanzó mil denuestos contra el falaz tlaxcalteca y levantando la orla de su huipil echó a correr por la llanura, gimiendo su intensa desventura de amor.

Su grácil figura se reflejaba sobre las insadas superficies de las aguas del gran lago de Texcoco, cuando el guerrero azteca se volvió para mirarla. Y la vio correr seguida del marido y pudo comprobar que ella huía desfavorida.

Entonces apretó con furia el puño de la macana y separándose de las filas de guerreros humillados se lanzó en seguimiento de los dos.

Pocos pasos separaban ya a la hermosa Xochiquétzal del marido despreciable cuando les dio alcance el guerrero azteca.

No hubo ningún intercambio de palabras porque toda palabra y razón sobraba allí. El tlaxcalteca extrajo el venablo que ocultaba bajo la tilma y el azteca esgrimió su macana dentada, incrustada de dientes de jaguar y de Coyámetl que así se llamaba al jabali.

Chocaron el amor y la mentira.

El venablo con erizada punta de pedernal buscaba el pecho del guerrero y el azteca mandaba furioso golpes de macana en dirección del cráneo de quien le había robado a su amada haciendo uso de arteras engañas.

Y así se fueron yendo, alejándose del valle, cruzando en la más ruda pelea entre lagunas donde saltaban los ajolotes y las xochócatl que son las ranitas verdes de las orillas limosas.

Mucho tiempo duró aquél duelo.

El tlaxcalteca defendiendo a su mujer y a su mentira.

El azteca el amor de la mujer a quien amaba y por quien tuvo arrestos para regresar vivo al Anáhuac.

Al fin, ya casi al atardecer, el azteca pudo herir de muerte al tlaxcalteca quien huýó hacia su país, hacia su tierra tal vez en busca de ayuda para vengarse del azteca.

El vencedor por el amor y la verdad regresó buscando a su amada Xochiquétzal.

Y la encontró tendida para siempre, muerta a la mitad del valle, porque una mujer que amó como ella no podía vivir soportando la pena y la vergüenza de haber sido de otro hombre, cuando en realidad amaba al dueño de su ser y le había jurado fidelidad eterna.

El guerrero azteca se arrodilló a su lado y lloró con los ojos y con el alma.

Y cortó maravillas y flores de xoxocotzin con las cuales cubrió el cuerpo inanimado de la hermosa Xochiquétzal. Coronó sus sienes con las fragantes flores de Yoloxóchitl que es la flor del corazón y trajo un incensario en donde quemó copal. Llegó el zenzontle también llamado Zenzontletole, porque imita las voces de otros pajarillos y quiere decir 400 trinos, pues cuatrocientos tonos de cantos dulces lanza esta avecilla.

Por el cielo en nubarrones cruzó Tlahuepoch, que es el mensajero de la muerte.

Y cuenta la leyenda que en un momento dado se estremeció la tierra y el relámpago atronó el espacio y ocurrió un cataclismo del que no hablaban las tradiciones orales de los Tlachiques que son los viejos sabios y adivinos, ni los tlaculos habían inscrito en sus pasmosos códices. Todo tembló y se anubló la tierra y cayeron piedras de fuego sobre los cinco lagos, el cielo se hizo tenebroso y las gentes del Anáhuac se llenaron de pavora.

Al amanecer estaban allí, donde antes era valle, dos montañas nevadas, una que tenía la forma inconfundible de una mujer recostada sobre un túmulo de flores blancas y otra alta y elevada adoptando la figura de un guerrero azteca arrodillado junto a los pies nevados de una impresionante escultura de hielo.

Las flores de las alturas que llamaban Tepexóchitl por crecer en las montañas y entre los pinares, junto con el aljófár mañanero, cubrieron de blanco sudario las faldas de la muerta y pusieron alba blanca de nieve hermosa en sus senos y en sus muslos y la cubrieron toda de armiño.

Desde entonces, esos dos volcanes que hoy vigilan el hermoso valle del Anáhuac, tuvieron por nombres Iztaccihuatl que quiere decir mujer dormida y Popocatepetl, que se traduce por montaña que humea, ya que a veces suele escapar humo del inmenso pebetero.

En cuanto al cobarde engañador tlaxcalteca, según dice también esta leyenda, fue a morir desorientado muy cerca de su tierra y también se hizo montaña y se cubrió de nieve y le pusieron por nombre Poyaueteclat, que quiere decir Señor Crepuscular y posteriormente Citlaltepétl o cerro de la estrella y que desde allá lejos vigila el sueño eterno de los dos amantes a quienes nunca podrá ya separar.

Eran los tiempos en que se adoraba al dios Coyote y al Dios Colibrí y en el panteón azteca las montañas eran dioses y recibían tributos de flores y de cantos, porque de sus faldas escurre el agua que vivifica y fertiliza los campos.

Durante muchos años y poco antes de la conquista, las doncellas muertas en amores desdichados o por mal de amor, eran sepultadas en las faldas de Iztaccihuatl, de Xochiquétzal, la mujer que murió de pena y de amor y que hoy yace convertida en nivea montaña de perenne armiño.

Carlos Franco Sodja

## AGRADECIMIENTOS

*"hoy es fe en lo futuro lo que ayer fue esperanza ..."*  
a.v.ch

*A mis padres, por su apoyo  
y comprensión*

*A mi tía, de la que siempre  
recibí consejos*

*A mis hermanas que sepan  
que pueden contar conmigo*

*A Paty Miranda por saber  
ser amiga y aguantarme  
todos estos años*

*A familiares y amigos que  
de alguna manera estuvieron  
presentes en la realización  
de este trabajo*

*A Eloisa Guerra por su amistad  
confianza y jalones de oreja*

*A mis maestros por los  
conocimientos que me  
transmitieron*

*A todos aquellos que se vieron  
Involucrados en el camino de  
mi vida.*

*Gracias*

*Patricia De Anda Hurtado*

*(Dos caminos divergían en un bosque, y yo, seguí el camino menos frecuentado, y eso estableció toda la diferencia).*  
ROBERTO FROST. "El camino no frecuentado".

### **Dedicada a:**

*Mi madrina, mis tíos Joaquín, Francisco, Cristina, Ventura y (San), quienes me dieron una vida plena, con mucho, mucho amor, confianza y fe, por ayudarme a alcanzar una de mis grandes metas, culminar mis estudios, y que a pesar de la distancia, en las últimas fechas me han brindado palabras de aliento y apoyo incondicional en cualquier circunstancia,*

### **Agradecimientos**

*Con mucho cariño y respeto a la directora de este trabajo la Biol. Eloisa Adriana Guerra Hernández, por su amistad, confianza, apoyo, consejos, dedicación, paciencia, voluntad, por los múltiples merecidos jalones de oreja y más, que me ha dado hasta ahora.*

*A mis sinodales: Dra. Bertha Peña Mendoza, M en C. J. Salvador Hernández Áviles M. en B.R.A. Guillermo A. Blancas Arroyo, M. en C. Ernesto Mendoza Vallejo, quienes nos ayudaron con sus correcciones y opiniones con el fin de mejorar y enriquecer este arduo trabajo.*

*A mi amiga inseparable Paty De Anda, por compartir conmigo muchas y grandes aventuras, desde los largos y pesados días de constante trabajo que también fueron ocasiones de compañerismo y solidaridad, hasta nuestras buenas pintas.*

*Al maestro Gerardo Cruz Flores que en los momentos "difíciles" nos brindó ayuda incondicional, por sus palabras de aliento y su valioso tiempo.*

*A nuestro compañero y amigo, Rigoberto que nos ayudó cuando más lo necesitamos.*

*A mis papas (tíos) y demás familiares por el reciente apoyo recibido.*

*Por último, a todas aquellas personas que siempre me brindaron su amistad, creyeron y confiaron en mí a lo largo de mi formación profesional.*

**GRACIAS**

*Gloria Patricia Miranda Herrera*

# ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	10
Introducción.....	11
Ciclo del agua.....	13
Contaminación natural.....	16
Marco teórico.....	17
Área de estudio.....	22
Ubicación geográfica.....	22
Clima.....	24
Flora y fauna.....	24
Objetivo general.....	24
Objetivos particulares.....	27
Métodos.....	28
Fase inicial.....	28
Segunda fase.....	28
Tercera fase.....	29
Cuarta fase.....	31
Resultados y discusiones.....	32
Subcuenca Atoyac.....	34
Subcuenca Nexapa.....	42
Subcuenca Cuautla.....	50
Subcuenca de Amecameca.....	58
Subcuenca de la Compañía.....	65
Comparación y variación de la calidad del agua de dos escurrimientos principales.....	75
Conclusiones.....	79
Lliteratura citada.....	81
Anexo.....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS Y MAPAS

<b>Figura 1.</b> Representación del ciclo del agua.....	15
<b>Mapa 1.</b> Ubicación del área de estudio, Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia....	23
<b>Mapa 2.</b> Distribución de los puntos de monitoreo en las cinco subcuencas del Parque Nacional Izta-Popo.....	33
<b>Mapa 3.</b> Ubicación de los puntos de monitoreo en la subcuenca Atoyac.....	34
<b>Mapa 4.</b> Ubicación de los puntos de monitoreo en la subcuenca Nexapa.....	42
<b>Mapa 5.</b> Ubicación de los puntos de monitoreo en la subcuenca Cuautla.....	50
<b>Mapa 6.</b> Ubicación de los puntos de monitoreo en la subcuenca Amecameca.....	58
<b>Mapa 7.</b> Ubicación de los puntos de monitoreo de la subcuenca De la Compañía.....	65

## ÍNDICE DE TABLAS Y CUADROS

<b>Tabla 1.</b> Distribución de los diferentes puntos de monitoreo dentro de las dos cuencas delimitadas dentro del Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl.....	32
<b>Tabla 2. (Anexo)</b> Análisis multivariable de los parámetros físicos, químicos e hidrológicos de las cinco subcuencas.....	87
<b>Cuadro 1. (Anexo)</b> Para determinar el grado de alcalinidad de las aguas superficiales según Nisbet y Verneaux (1970) citados en Arrignon (1984).....	85
<b>Cuadro 2. (Anexo)</b> Para determinar el grado de dureza de las aguas superficiales, tomada de Gray (1994) y Romero (1999).....	85
<b>Cuadro 3. (Anexo)</b> Para la interpretación del contenido de materia orgánica en muestras de suelo según Moreno (1970, citado en Reyes, 1996).....	86
<b>Cuadro 4. (Anexo)</b> Para determinar la velocidad de la corriente según Berg, citado por Arrignon (1984).....	86
<b>Cuadro 5. (Anexo)</b> Para determinar la dinámica de cauces (Gómez, 1999).....	86

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1.</b> Comparación térmica con respecto a la altitud de los puntos correspondientes a la subcuenca Atoyac.....	35
<b>Gráfica 2.</b> Comportamiento de la conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) a lo largo del gradiente altitudinal en la subcuenca Atoyac.....	36
<b>Gráfica 3.</b> Relación de alcalinidad total ( $\text{mg}/\text{l}$ de $\text{CaCO}_3$ ), dureza total ( $\text{mg}/\text{l}$ de $\text{CaCO}_3$ ) y pH, con respecto a la altitud en la subcuenca Atoyac.....	37
<b>Gráfica 4.</b> Relación entre sulfuros ( $\text{mg}/\text{l}$ ), sulfatos ( $\text{mg}/\text{l}$ ) y oxígeno disuelto ( $\text{mg}/\text{l}$ ) a lo largo del gradiente altitudinal de la subcuenca Atoyac.....	38
<b>Gráfica 5.</b> Relación entre materia orgánica del sedimento (%) y carbono orgánico ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca Atoyac.....	40
<b>Gráfica 6.</b> Relación entre velocidad ( $\text{m}/\text{s}$ ) y aforo de corriente ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) respecto a la altitud en la subcuenca Atoyac.....	40
<b>Gráfica 7.</b> Comparación térmica de la subcuenca Nexapa.....	43
<b>Gráfica 8.</b> Comportamiento de la conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) dentro la subcuenca Nexapa.....	44
<b>Gráfica 9.</b> Relación de alcalinidad total ( $\text{mg}/\text{l}$ $\text{CaCO}_3$ ), dureza total ( $\text{mg}/\text{l}$ $\text{CaCO}_3$ ) y pH en la subcuenca Nexapa.....	44
<b>Gráfica 10.</b> Relación entre sulfuros ( $\text{mg}/\text{l}$ ), sulfatos ( $\text{mg}/\text{l}$ ) y oxígeno disuelto ( $\text{mg}/\text{l}$ ) en la subcuenca de Nexapa.....	46
<b>Gráfica 11.</b> Relación entre materia orgánica del sedimento (%) y carbono orgánico particulado ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ) en la subcuenca Nexapa.....	47
<b>Gráfica 12.</b> Relación entre velocidad ( $\text{m}/\text{s}$ ) y aforo de corriente ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) a lo largo de la subcuenca Nexapa.....	49
<b>Gráfica 13.</b> Comparación térmica con respecto a la altitud de la subcuenca Cuautla.....	51
<b>Gráfica 14.</b> Comportamiento de la conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) a lo largo del gradiente altitudinal de la subcuenca Cuautla.....	52
<b>Gráfica 15.</b> Relación de la alcalinidad total ( $\text{mg}/\text{l}$ de $\text{CaCO}_3$ ), dureza total ( $\text{mg}/\text{l}$ de $\text{CaCO}_3$ ) y pH, con respecto a la altitud de la subcuenca Cuautla.....	52
<b>Gráfica 16.</b> Relación entre sulfuros ( $\text{mg}/\text{l}$ ), sulfatos ( $\text{mg}/\text{l}$ ) y oxígeno disuelto ( $\text{mg}/\text{l}$ ) con respecto al gradiente altitudinal de la subcuenca Cuautla.....	54
<b>Gráfica 17.</b> Relación entre materia orgánica del sedimento (%) y carbono orgánico particulado ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca Cuautla.....	55
<b>Gráfica 18.</b> Relación entre velocidad ( $\text{m}/\text{s}$ ) y aforo de la corriente ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca Cuautla.....	56
<b>Gráfica 19.</b> Comparación térmica con respecto a la altitud de la subcuenca Amecameca.....	59
<b>Gráfica 20.</b> Comportamiento de la conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca Amecameca.....	60
<b>Gráfica 21.</b> Relación de la alcalinidad total ( $\text{mg}/\text{l}$ de $\text{CaCO}_3$ ), dureza total ( $\text{mg}/\text{l}$ de $\text{CaCO}_3$ ) y pH, con respecto a la altitud de la subcuenca Amecameca.....	61
<b>Gráfica 22.</b> Relación entre sulfuros ( $\text{mg}/\text{l}$ ), sulfatos ( $\text{mg}/\text{l}$ ) y oxígeno disuelto ( $\text{mg}/\text{l}$ ) con respecto al gradiente altitudinal de la subcuenca Amecameca.....	62
<b>Gráfica 23.</b> Relación entre materia orgánica del sedimento (%) y carbono orgánico particulado ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca Amecameca.....	63
<b>Gráfica 24.</b> Relación entre velocidad ( $\text{m}/\text{s}$ ) y aforo de la corriente ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca Amecameca.....	64

---

Gráfica 25. Comparación térmica con respecto a la altitud de la subcuenca De la Compañía.....	66
Gráfica 26. Comportamiento de la conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca De la Compañía.....	66
Gráfica 27. Relación de la alcalinidad total ( $\text{mg}/\text{l}$ de $\text{CaCO}_3$ ), dureza total ( $\text{mg}/\text{l}$ de $\text{CaCO}_3$ ) y pH, con respecto a la altitud de la subcuenca De la Compañía.....	67
Gráfica 28. Relación entre sulfuros ( $\text{mg}/\text{l}$ ), sulfatos ( $\text{mg}/\text{l}$ ) y oxígeno disuelto ( $\text{mg}/\text{l}$ ) con respecto al gradiente altitudinal de la subcuenca De la Compañía.....	68
Gráfica 29. Relación entre materia orgánica del sedimento (%) y carbono orgánico particulado ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca De la Compañía.....	69
Gráfica 30. Relación entre velocidad ( $\text{m}/\text{s}$ ) y aforo de la corriente ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca De la Compañía.....	70
Gráficas 31. Comparación de las cinco subcuencas para conductividad.....	74
Gráficas 32. Comparación de las cinco subcuencas para alcalinidad total.....	74
Gráficas 33. Comparación de las cinco subcuencas para dureza total.....	74
Gráficas 34. Comparación de las cinco subcuencas para pH.....	75
Gráficas 35. Comparación de las cinco subcuencas para sulfuros.....	75
Gráficas 36. Comparación de las cinco subcuencas para sulfatos.....	76
Gráficas 37. Comparación de las cinco subcuencas para oxígeno disuelto.....	76
Gráficas 38. Comparación de las cinco subcuencas para materia orgánica del sedimento.....	77
Gráficas 39. Comparación de las cinco subcuencas para carbono orgánico particulado.....	77
Gráficas 40. Comparación de las cinco subcuencas para velocidad.....	77
Gráficas 41. Comparación de las cinco subcuencas para aforo.....	78

## RESUMEN

El presente trabajo tiene la finalidad de dar a conocer las condiciones actuales de sistemas lóticos en el Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia, los cuales forman parte de las subcuencas Atoyac, Nexapa, Cuautla (cuenca del Balsas), Amecameca y De la Compañía (ambas en la cuenca de México) dentro de los estados de México, Puebla y Morelos. Se realizaron muestreos mensuales entre julio del 2001 y septiembre del 2002 y se analizaron 216 puntos de monitoreo, en las que se incluyen 143 puntos con muestra de agua, 55 registrados secos, 12 perturbados sin muestra de agua, 3 entubamientos y 3 cajas de almacenamiento de agua; esta cantidad de registros esta en función del área de cada subcuencuena y de la accesibilidad de la zona. De los parámetros que presentan una mayor correlación se encuentran alcalinidad total, conductividad, dureza total, de calcio y sulfatos con valor de probabilidad menor al 0.8. La mayoría de los parámetros físicos y químicos de los escurrimientos en las subcuencas manifestaron un comportamiento en función de la altitud, a mayor altitud las cantidades de temperatura ambiente, temperatura del agua, alcalinidad total, dureza total, dureza de calcio, conductividad y sulfatos fueron menores en comparación a altitudes bajas, principalmente causadas por la actividad antropogénica; en cuanto al pH, oxígeno disuelto, carbono orgánico particulado, materia orgánica del sedimento, velocidad y aforo de la corriente, su variabilidad depende de las condiciones del entorno y de la dinámica de los sistemas, además de lo antes mencionado; con respecto a los sulfuros, sus altas concentraciones en las zonas de mayor altitud son atribuidas a la actual actividad volcánica. Entre subcuencas, se encontró que, en cuanto al uso y manejo que se tiene de los sistemas, la que presentó menor perturbación fue Atoyac seguido de Amecameca, Nexapa, De la Compañía y Cuautla; sin embargo, al compararlas con respecto a los parámetros físicos, químicos e hidrológicos, se presenta diferencia entre cuencas (del Balsas y México). Y finalmente pese a las influencias antropogénicas en las zonas aledañas del Parque Izta-Popo, los parámetros analizados cumplen con los intervalos establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas para aguas naturales, aunque se requiere de tratamiento en 10 sitios, antes del vertimiento a los cauces.

## INTRODUCCIÓN

Con fundamento en el artículo 46 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, el Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SINAP) comprende como categoría de Parque Nacional, dentro de las Áreas Naturales Protegidas, la región constituida por dos de las cumbres más elevadas del País, ubicada en el Eje Neovolcánico, y denominada Parque Nacional "Izta-Popo" (SEDUE, 1986). Los límites del Parque Nacional fueron modificados de los 3000 msnm con una extensión de 62 200 ha, mediante decreto expedido el 15 de octubre de 1947, por el presidente Miguel Alemán Valdés, el cual se publicó el 11 de febrero de 1948 en el Diario Oficial de la Federación, en donde se estableció que los límites inferiores del Parque se levantan en la cota de los 3 600 msnm. Con esta modificación de linderos la superficie del Parque Nacional se vio reducida a 25 679 hectáreas, anteriormente incluía terrenos ubicados en el Estado de México, Morelos, Puebla y Tlaxcala. Según el fundamento legal, ésta área pertenece a la nación; sin embargo con certeza 14 000 hectáreas son de ella y 11 679 ha no encuentran posesión definida o bien con dueños (Lugo, 1984; SEDUE, 1986). Para la mejor protección de sus recursos naturales, Chávez y Trigo en 1996 proponen una modificación a estos límites comprendiendo una superficie de 30 770 hectáreas siguiendo la cota de los 2500 msnm.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente (LGEEPA) define como Áreas Naturales Protegidas (ANP) a "las zonas del territorio nacional y aquéllas sobre las que la Nación ejerce su soberanía y jurisdicción, en que los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del hombre, y han quedado sujetas al régimen de protección" (Chávez y Trigo, 1996; INE-SEMARNAP, 1995).

En términos biológicos las ANP preservan ecosistemas y con ellos, los distintos niveles de la jerarquía ecológica, a diferencia de la protección de especies individuales que era la forma en que hace algunos años se hacía la conservación biológica. Cada ANP tiene sus funciones específicas y sus objetivos en la preservación biológica, estos van de acuerdo con la categoría que tiene cada área y su relación con el hombre (Ordoñez y Flores, 1995). La creación, financiamiento y administración de las áreas naturales protegidas es un instrumento central para la protección de la biodiversidad y el mantenimiento de un gran número de funciones ambientales vitales. Estas áreas configuran la modalidad más valiosa del capital natural, el cual genera un caudal estratégico de bienes y servicios ambientales (INE-SEMARNAP, 1995).

Una de las razones que merece atención en cuanto a protección y conservación del Parque es su papel como zona de captación de agua y de conservación de especies protegidas tanto vegetales como animales, además de ofrecer un alto potencial para el desarrollo de actividades ecoturísticas por su cercanía con zonas urbanas importantes como la Ciudad de México y de Puebla (Chávez y Trigo, 1996).

---

Por otro lado, la actividad antropogénica dentro de la zona se manifiesta en dos grandes procesos: la expansión urbana y la explotación agropecuaria y forestal. Estos cambios en el uso del suelo afectan los recursos hídricos de la región, y han propiciado un impacto considerable que afecta la flora y fauna.

En los últimos años el Popocatepetl ha presentado actividad volcánica, hecho que repercute en las condiciones ambientales y sociales, provocando alteraciones en las comunidades de la zona; a esto se suma el deterioro en las áreas forestales provocado por los contaminantes urbanos, como consecuencia del aumento de diferentes industrias y vehículos automotores debido a la cercanía con la ciudad de México, los cuales son eventualmente arrastrados por el viento hacia el Parque Nacional, provocando daños como el que ocasiona la lluvia ácida generando alteraciones físicas y químicas a la zona.

En lo concerniente a la hidrología de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, estos se ubican en dos cuencas: la de México que se divide en dos subcuencas: Río la Compañía y Río Amecameca, y la del Balsas que se divide en las subcuencas del Río Cuautla, del Río Atoyac y del Río Nexapa, lo que indica que la red hidrográfica del Parque Nacional es vigorosa e importante como suministro de agua para estas poblaciones vecinas (Chávez y Trigo, 1996; Lugo, 1984).

En el Iztaccíhuatl, las nieves persistentes se detienen en términos generales en la cota de los 4 500 msnm, la parte cubierta de nieve está constituida por un casquete de profundidad variable que desempeña un papel primordial, ya que sirve como condensador eficaz de la humedad del aire, regulador de la temperatura y climatología de la montaña; los deshielos son fuente normal y constante de aguas superficiales y subterráneas. En la antigüedad esa masa de nieve era mayor en espesor y extensión con un alto poder erosivo, contribuyendo a la desintegración de las rocas para formar los cauces que sigue el agua, sin embargo, en la actualidad esta superficie de hielo es más pequeña. En las faldas del volcán, la caída de agua es mucho mayor, y en la planicie cae en forma sólida como granizo, por este motivo el agua no escurre inmediatamente que cae, sino que permanece por mucho tiempo sobre el terreno, hasta su lenta fusión, impregnando el suelo y provocando que mayor proporción de agua se convierta en subterránea en terreno permeable (Vargas, 1997). En el Popocatepetl hasta 1986 se presentaban tres glaciales que cubrían una superficie de 72 hectáreas surcada por anchas y profundas grietas, con una pequeña laguna en la cima que varía de extensión según la época del año (SEDUE, 1986).

Por lo tanto los recursos hídricos de la zona provienen principalmente del deshielo de ambos volcanes y precipitaciones pluviales, que son abundantes a estas altitudes. Las aguas que descienden por las vertientes constituyen corrientes de dirección y destino diversos uniéndose en distintos puntos para constituir algunos de los principales afluentes (SEDUE, 1986; SARH, 1992).

---

## CICLO DEL AGUA

El agua como elemento de la vida ha sido partícipe determinante en el desarrollo de la humanidad, es por eso que toda gran cultura se ha desarrollado cerca de ella. Ésta en sus diversos estados físicos ocupa las tres cuartas partes del planeta, el hombre ha aprendido a usar en sus actividades diarias: la de los ríos, la de los lagos, del subsuelo y en mucho menor proporción el agua de mar.

Dentro del ciclo hidrológico, el agua está en constante movimiento, dirigida por la energía solar; los mares del mundo están expuestos a esta en grandes cantidades y aproximadamente la mitad de dicha radiación que absorbe el mar, produce la evaporación de sus aguas así como también las fluctuaciones climatológicas y la turbulencia que se asocian con dicho ciclo.

1. El vapor de agua formado por la evaporación de los mares, lagos, ríos o el suelo como consecuencia de la radiación solar o transpiración de las plantas, puede recorrer grandes distancias hacia la atmósfera. Las fluctuaciones climatológicas van acompañadas de incrementos y reducciones en la concentración de vapor de agua atmosférico para formar nubes, es interesante observar que la formación de nubes se produce cuando se registra una condensación en pequeñísimas partículas de polvo, humo y sal de mar en el aire, que sirven como núcleos en que se pueden desarrollar dentro de la nube.

Aunque alrededor del 80% de las precipitaciones vuelven a caer en los océanos, el resto cae sobre tierra. Es esta agua la que rellena el suelo y las aguas subterráneas, alimenta las corrientes de los ríos y lagos y provee toda el agua necesaria para las plantas, animales y desde luego los humanos. El ciclo es continuo y así el agua se podría considerar un recurso renovable.

2. Casi todos nuestros suministros de agua dulce provienen de precipitaciones que caen sobre el área de captación. También conocida como la cuenca del río, la zona de captación es el área de tierra, frecuentemente rodeada de montañas, en la cual el agua que cae se filtrará a un río en particular. Una zona de captación de un río principal estará formada por muchas subáreas de captación menores, donde cada una filtrará el agua a los afluentes del río principal. Cada subárea de captación tendrá diferentes rocas y tipo de suelo, y por lo tanto cada una tendrá diferentes tipos de actividades de uso de la tierra lo que afectará la calidad del agua. El agua filtrada desde cada subárea de captación puede ser diferente en términos de composición química.

Conforme los afluentes se incorporan al río principal, mezclan sus aguas con otras subáreas de captación aguas arriba, alterando constantemente la composición química del agua. Aguas de diferentes áreas del país son por lo tanto químicamente únicas.

Cuando una precipitación cae en la zona de captación acontecerá uno de los tres destinos principales:

- Puede permanecer en el suelo como humedad de superficie además que una porción de la precipitación se puede almacenar como nieve en las montañas y los casquetes y glaciaciones polares, hasta que la temperatura aumente suficientemente para derretirla. El almacenamiento como nieve es en algunas regiones una importante fuente de agua potable.
- La precipitación discurre sobre la superficie por pequeños canales para convertirse en escorrentía hasta llegar a los cauces y lagos, o continúa como corriente de superficie por los ríos hasta el mar. Esta es la base de la procedencia de todos los suministros de aguas de superficie y finalmente se evapora a la atmósfera.
- La tercera ruta es para la precipitación que se infiltra en el suelo y que percola lentamente dentro de la tierra para convertirse en agua subterránea, la cual se almacena en los sedimentos porosos y rocas. Las aguas subterráneas pueden permanecer en estas láminas porosas por períodos que van desde justo unos pocos días hasta millones de años. Finalmente el agua subterránea se traslada a la superficie por capilaridad ascendente natural, por las plantas, por la filtración del agua subterránea a los ríos superficiales a lagos o directamente al mar, o por bombeo artificial desde pozos o perforaciones. Claramente, como el agua se mueve a través del sistema de vías superficiales y subterráneas su calidad se altera, frecuentemente de forma espectacular, así la calidad del agua que sale de la zona de captación será diferente del agua que ha caído en ella como precipitación.

El agua por ser un recurso natural limitado, antes de que llegue a los mares debe obligar al hombre a darle un uso racional, es decir no desperdiciarla y mantener su calidad lo mejor posible, tratando de darle el uso más adecuado según ésta, es decir reutilizando el agua en actividades que requieran agua de menor calidad como el riego agrícola, las necesidades industriales, para fines domésticas, arrastrar desechos y aguas negras; para ello es necesario determinar su calidad a través de análisis físicos, químicos y microbiológicos. (Gray, 1994; Lapeña, 1999; Ricklets, 1998).

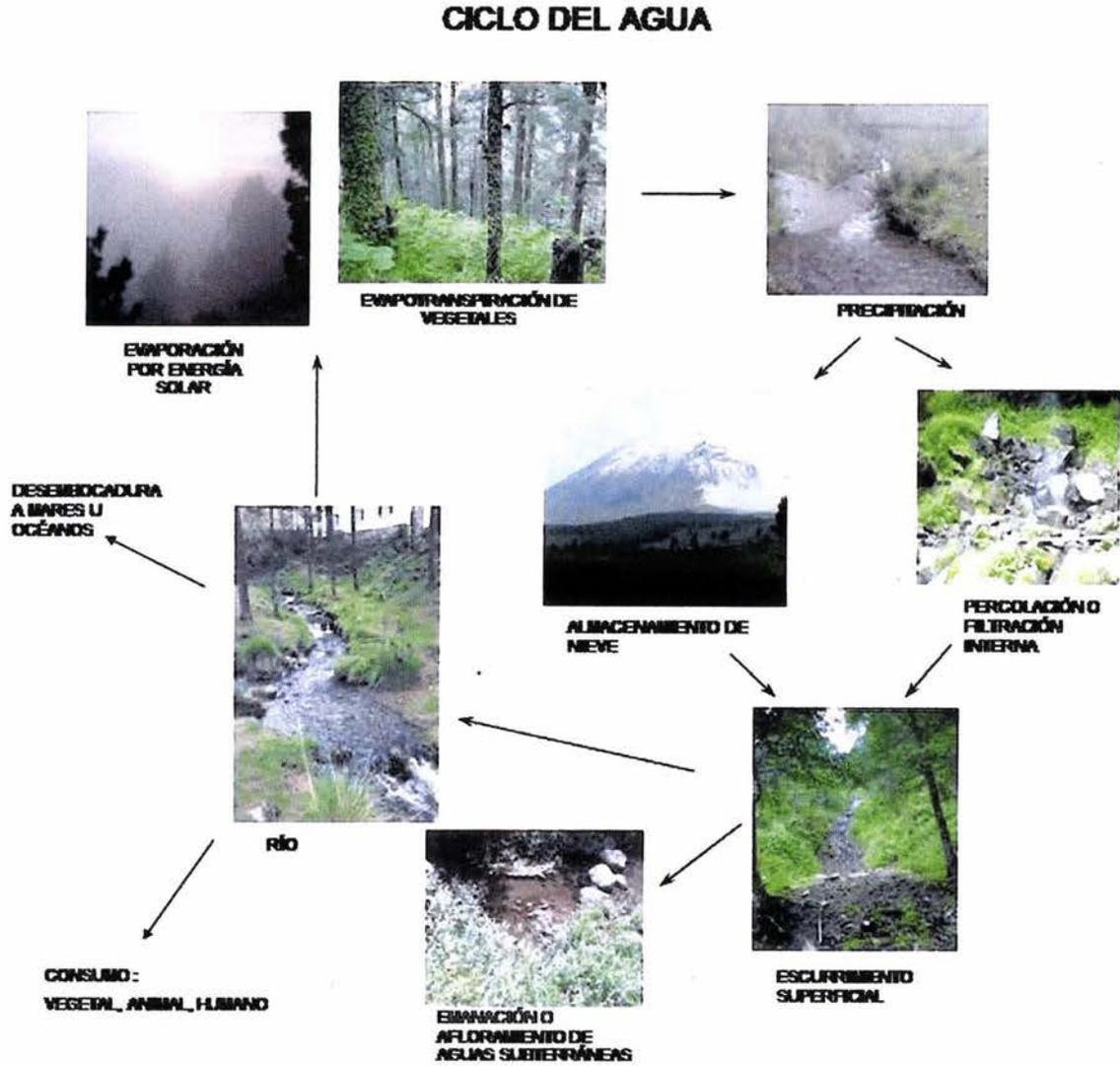


Figura 1. Representación del ciclo del agua.

## CONTAMINACIÓN NATURAL.

La relación entre el ciclo geoquímico y el ciclo hidrológico causa la contaminación del agua de manera natural.

Las aguas naturales siempre contienen impurezas, a pesar de que provengan de un agua de lluvia teóricamente pura. En el ciclo hidrológico la evaporación del agua hacia las nubes constituye un proceso purificador. Sin embargo, con su caída en forma de lluvia, el agua inicia un proceso de contaminación cuyo resultado final dependerá de las condiciones atmosféricas y climáticas de la región en que caiga, de las características geológicas del terreno y de su distribución como aguas superficiales o subterráneas.

El agua que se precipita de la atmósfera está saturada de oxígeno y, en general, es ligeramente ácida con un pH inferior a 6. La acidez puede verse incrementada por contaminantes atmosféricos principalmente óxidos de azufre y nitrógeno. Cuanto más ácida sea el agua de lluvia, más reaccionará con el material geológico con el que entre en contacto.

El agua de lluvia infiltrada en el suelo puede aumentar su acidez debido a los procesos biológicos, en particular la respiración de las plantas y microorganismos que viven en la capa más exterior. La acidez también puede aumentar, aunque más limitadamente, debido a productos de descomposición orgánica tales como ácidos húmico y fúlvico, captación de nutrientes por las raíces y bacterias nitrificantes, también disuelve minerales y sales, además se absorbe CO<sub>2</sub>, producto de la materia orgánica en descomposición, formándose ácido carbónico. Este ácido diluido capacita al agua para reaccionar químicamente con los fragmentos minerales, liberando carbonatos y bicarbonatos que pueden ir también en solución, una vez que el agua entra en la matriz geológica se efectúan otras reacciones químicas, ocasionando que los compuestos menos solubles se precipiten conforme alcanzan los límites de solubilidad, o que las bacterias puedan reducir a los sulfatos en solución.

Finalmente, el agua regresa a la atmósfera por evaporación dejando atrás la materia mineral en el suelo, o bien, esa agua regresa al mar como descarga del agua del subsuelo o en forma de escurrimiento pluvial acarreado su contenido mineral con ella (Castro, 2000; Lapeña, 1999).

## MARCO TEÓRICO

Para obtener una imagen verdadera de la naturaleza y dinámica de los cuerpos de agua es necesario evaluar y analizar sus características físico-químicas y su interacción en el ecosistema, esto implica el manejo de diferentes parámetros, como una forma de estandarizar dichas características, como la temperatura, que es importante conocer con toda precisión, porque influye en las propiedades físicas, químicas y biológicas de un río, ya que juega un papel muy importante en la solubilidad de los gases en el agua así, como la disolución de sales, y por lo tanto en la conductividad eléctrica, el valor del pH y velocidad de reacciones químicas, además de que puede afectar la tolerancia de los organismos acelerando o disminuyendo su metabolismo (Stoker y Seager, 1981; Westman, 1984), en la tasa de fotosíntesis de macrofitas acuáticas y la sensibilidad de los organismos a descargas tóxicas, parásitos y enfermedades (Mitchell y Stap, 1995). Se ha demostrado que la toxicidad de muchos compuestos aumenta con la temperatura, debido al incremento de la biodisponibilidad de los contaminantes (Hernández y Rivera, 1996; Mason, 1991), lo que significa que puede alterar el estado físico-químico de estos y por ende el de cualquier sustancia o reacción. De modo general, la temperatura de las aguas superficiales está en función de la temperatura del aire, la latitud y radiación solar en la zona (Wetzel, 2001).

Otra propiedad física importante es la conductividad, que representa la capacidad de conducción de la corriente eléctrica en función de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua (Rodier, 1990; Romero, 1999; Tebbutt, 1995; Wetzel, 2001). Este parámetro depende en gran parte de la cantidad de sólidos y sales electrolizables disueltos, de forma que cuanto mayor sea el contenido de sólidos mayor será la conductividad eléctrica, aumentando también con el tipo de iones involucrados, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, estado de oxidación de los mismos, así como la concentración relativa de cada uno, la temperatura y la movilidad de los iones (Castro, 2000). El contenido en sales aumenta cuando los terrenos en contacto con el agua están cargados de ellas, el tiempo de contacto, la superficie de este y a veces la velocidad del agua (Arrignon, 1984; Ramos, 2001). En general, las soluciones de ácidos, bases y sales son buenas conductoras, pero las de compuestos orgánicos lo son escasa o nulamente (Jiménez, 2002). Se utiliza para evaluar las variaciones de la concentración de minerales disueltos en aguas naturales y residuales, así como para el monitoreo de la calidad en abastecimientos de agua con alta pureza (ASTM, 1991; APHA-AWWA-WPCF, 1992).

Las características químicas tienden a ser más específicas en su naturaleza que algunos de sus parámetros físicos y por eso son útiles para evaluar las propiedades de un cuerpo acuático.

La medida del pH es uno de los parámetros más importantes y frecuentes utilizadas en el análisis químico del agua. Éste se utiliza en las determinaciones de alcalinidad y dióxido de carbono y en muchos otros equilibrios ácido-base (APHA-AWWA-WPCF, 1992; Castro, 2000).

A diferencia de éste, la alcalinidad mide la cantidad de material alcalino disponible en el agua y refleja la concentración de iones, mientras que el anterior expresa la intensidad de la alcalinidad o la actividad de los iones (APHA-AWWA-WPCF, 1992; Armijo, 1982; Castro 2000; Manahan, 2001).

Es por ello que se define a la alcalinidad de un agua como la capacidad para neutralizar ácidos y constituye la suma de todas las bases titulables; en muchas aguas de superficie es considerada dentro de las Normas Oficiales Mexicanas para aguas naturales, debido a que es importante evaluar éste parámetro ya que se mide en la escala de pH; además, refleja la capacidad de amortiguamiento que tiene una corriente de agua para soportar cambios bruscos de pH, con un importante mecanismo de equilibrio interno que involucra al CO<sub>2</sub>, porque define la concentración de carbono inorgánico que está a disposición de los productores primarios, la forma y cantidad de metales alcalino-térreos en solución. (Hernández y Rivera, 1996; Romero, 1999; Tebbutt, 1995). La medición de este parámetro depende de su contenido de hidróxidos, carbonatos, bicarbonatos de calcio, magnesio, sodio y potasio, por lo que suele tomarse como una indicación de la concentración de estos componentes; aunque en los valores determinados también pueden contribuir los boratos, fosfatos, silicatos y otras bases. Normalmente se divide en alcalinidad cáustica, por encima de pH 8.2 y alcalinidad total por encima de pH 4.5 (APHA-AWWA-WPCF, 1992; Castro 2000; Manahan, 2001).

Así mismo, la dureza es determinante en la productividad del sistema y en el metabolismo de los seres vivos, ya que el calcio es utilizado para formar estructuras calcáreas, caparazones de los organismos zooplanctónicos y bentónicos y para dar rigidez a la pared celular del fitoplancton (Romero, 1999; Tebbutt, 1995); además todas las plantas con clorofila precisan de magnesio en forma del componente magnesioporfirina de las moléculas de clorofila y como micronutriente en las transformaciones enzimáticas de los organismos, especialmente en las transfosforilaciones de las algas, hongos y bacterias (Wetzel, 2001). Se define como la capacidad de los cationes de una muestra de agua, para reemplazar los iones de sodio o potasio de los jabones y formar productos poco solubles. Esta propiedad indeseable está compartida por la mayoría de los cationes que poseen cargas múltiples en las aguas naturales, las concentraciones de iones calcio y magnesio generalmente son superiores a las de cualquier otro ión metálico. La dureza del agua natural refleja la naturaleza de las formaciones geológicas que ha atravesado, por eso las aguas varían su dureza de un lugar a otro, siendo las superficiales menos duras que las subterráneas, la causa de dureza son los cationes metálicos divalentes, los cuales al reaccionar con ciertos aniones ocasionan incrustaciones (Barcenás, 1975).

El oxígeno es un parámetro determinante en el control de la calidad del agua, proporciona información importante acerca de las relaciones hidrológicas y bioquímicas que ocurren en la misma, su presencia es esencial para mantener las formas superiores de vida debido a que es fundamental para el metabolismo de todos los organismos acuáticos que presentan una respiración de tipo aerobio, además de ser un componente necesario para la realización de procesos de óxido-reducción de algunos iones como nitratos-amonio, ferroso-férrico y sulfatos-sulfitos, también se ha observado que altas concentraciones pueden provocar mortandad en la biota acuática (Arrignon, 1984; Ramos, 2001).

El efecto de una descarga de desechos en un río se determina principalmente por el balance de oxígeno en el sistema. Por tanto, sus propiedades de solubilidad y distribución son de suma importancia para comprender la distribución, el comportamiento y el crecimiento fisiológico de los organismos acuáticos (Metcalf y Eddy, 1981).

La materia orgánica del sistema es oxidada comúnmente por el oxígeno disuelto en agua que se consume también por la oxidación del amoníaco y del amonio disuelto, que son sustancias que igual que la materia orgánica, están presentes en agua como resultado de la actividad biológica y dan lugar a la formación del ión nitrato. El agua está en continua aireación por el propio fluir en ríos poco profundos, con lo que está constantemente reponiendo oxígeno (Baird, 2001; Romero, 1999; Tebbutt, 1995).

Aunque se habla de materia orgánica en términos de carbono, nitrógeno, fósforo y otros elementos (Smith, 1970 ; Whitlach y Johnson, 1974), también incluye una mezcla de compuestos con alto peso molecular clasificadas dentro de dos categorías, biodegradables y no biodegradables, las cuales incluyen: carbohidratos, proteínas, compuestos bituminosos (algunos lípidos) contenidos en las células, pigmentos y ligninas, así como células planctónicas, bacterias y productos finales de la descomposición de éstas (Gross, 1971 ; Hugh *et al*, 1985 ; Jiménez, 2002). Sin embargo, la cuantificación del carbono orgánico es lo más confiable en la evaluación de la materia orgánica puesto que este es el elemento más abundante en los tejidos. Debido a la gran variación del nitrógeno y fósforo en los organismos, sólo el carbono se puede analizar para estimar la abundancia de materia orgánica (García, 1989). Las características generales de la distribución y transformaciones del carbono orgánico en los sistemas acuáticos indican, que la fracción más abundante es la que se encuentra en forma soluble, aunque la particulada muestra un cierto contenido de éste que pueda existir en el cuerpo de agua ya que existen tres fuentes principales de carbono orgánico particulado una fuente alóctona y otras dos procedentes del fondo de los sistemas (Wetzel, 2001).

Los compuestos de azufre de las aguas naturales proceden de las rocas, de los fertilizantes y del transporte atmosférico por la precipitación y deposición de material seco, siendo ésta última fuente la que predomina actualmente sobre las demás debido al incremento de la combustión de productos industriales (Ramos, 2001; Wetzel, 2001). En forma mineral y como sulfatos orgánicos, es utilizado y requerido por los organismos para la síntesis de proteínas y es liberado en su degradación, al igual que otros nutrientes tiene un ciclo dentro de los sistemas acuáticos que se presenta en dos formas inorgánicas que son el sulfuro de hidrógeno y el ion sulfato (Ramos, 2001). El sulfato es uno de los aniones más comunes en las aguas naturales que se encuentran en concentraciones que varían desde unos pocos hasta varios miles de mg/l, este ión es uno de los más tóxicos, en grandes cantidades se han observado catarsis, deshidratación e irritación gastrointestinal (Raiswell *et al.*, 1983). Los sulfatos tienen enorme importancia ambiental porque forman compuestos con muchos agentes tóxicos, material orgánico y con el hidrógeno en aguas superficiales y es el primer agente acidificante en muchos ríos.

El sulfato es reducido a grupos sulfhídricos en la síntesis proteica, con producción concomitante de oxígeno, que se utiliza en las reacciones oxidativas metabólicas. El azufre reducido, en forma de ácido sulfhídrico, llega en grandes cantidades a la atmósfera a partir de gases volcánicos y de fuentes biogénicas e industriales (Metcalf y Eddy, 1981; Wetzel, 2001). Análogamente, el sulfuro de hidrógeno disuelto en agua puede oxidarse a ion sulfuro por medio de ciertas bacterias a azufre elemental o a sulfato. Algunas bacterias son capaces de usar este último como agente oxidante para convertir la materia orgánica, como el hidrato de carbono polimérico  $\text{CH}_2\text{O}$ , a dióxido de carbono, cuando la concentración de oxígeno en el agua es muy baja; en este proceso los iones sulfato se reducen a azufre elemental o incluso a sulfuro de hidrógeno (Baird, 2001). Parte del sulfato puede proceder de la oxidación de los sulfuros que derivan de la descomposición de la materia orgánica (Margalef, 1983).

La presencia de los sulfuros es común en las aguas residuales debido en parte a la descomposición de la materia orgánica, presente a veces en los residuos industriales, pero procedentes casi siempre de la reducción bacteriana de los sulfatos; aunque también se encuentran a menudo en el agua subterránea, especialmente en manantiales calientes, superficiales y en algunas descargas de aguas residuales. La ocurrencia del sulfuro de hidrógeno puede estar asociada con los procesos de putrefacción de suelos. Mientras que los sulfatos se distribuyen ampliamente en la naturaleza, siendo los drenados de minas una de sus principales fuentes, debido a la oxidación de la pirita (APHA-AWWA-WPCF, 1992; Jiménez, 2002).

Para conocer las características del agua en los afluentes es fundamental evaluar los parámetros hidrológicos como son: tipo de escurrimiento, velocidad y aforo de corriente (Q). Para ello es indispensable definir como escurrimiento, el agua que proviene de la precipitación y el deshielo que llega a una corriente para finalmente ser drenada y una vez que parte de esta ha sido interceptada y evaporada sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca; de acuerdo a esto se pueden dividir en tres clases: escurrimiento superficial, subsuperficial y subterráneo (Aparicio, 1994), de estos el primero es de interés para este estudio.

Conviene dividir estas rutas de la siguiente manera: una vez que la precipitación alcanza la superficie del suelo se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan, posteriormente se comienzan a llenar las depresiones del terreno y, al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre su superficie. Este escurrimiento llamado flujo en la superficie del terreno, se produce mientras el agua no llegue a cauces bien definidos (es decir, que no desaparecen entre dos tormentas sucesivas), en su trayectoria hacia la corriente más próxima, el agua que fluye sobre el terreno se sigue infiltrando, e incluso se evapora en pequeñas cantidades. Una vez que llega a un cauce bien definido el escurrimiento se convierte en corriente (Wetzel, 2001).

En cualquier estudio hidrológico es importante conocer la magnitud de los escurrimientos, ya que es factor determinante en definir el tipo de aprovechamiento recomendable para la corriente en estudio. El gasto (Q, también llamado aforo) se define como el volumen de agua que pasa por la sección transversal de una corriente por unidad

de tiempo y el conjunto de mediciones u operaciones que se realizan para determinar éste. Los métodos para la medición de gastos en caudales de aguas superficiales dependen del volumen, de las condiciones físicas, del lugar donde va a hacerse la medición y del grado de exactitud deseado. De cualquier forma, el volumen de descarga (gasto) depende directamente del área, de la sección transversal de la corriente (pero el área está en función del tirante en ese sitio) y de la velocidad del agua; para calcularlo existen diferentes métodos, y la selección de este depende básicamente del tipo de estudio que se haga y de la corriente que se pretenda medir, ya que cada uno tiene limitaciones (Lind, 1985; Rodríguez, 1975).

La velocidad de la corriente depende de la configuración del fondo, anchura y profundidad del lecho. En la sección de la vena líquida, las velocidades se reparten desigualmente, disminuyendo cerca del fondo y de las orillas a causa de los sucesivos pozos y escalones (Arrignon, 1984).

El agua de una corriente procede de la precipitación directa, del escurrimiento y de flujos del subsuelo. El escurrimiento se presenta cuando la precipitación rebasa la capacidad de infiltración de un suelo, de tal suerte que se establece un flujo continuo de agua a través de una red de canales que acarrea diversos materiales disueltos y en suspensión. Cabe señalar que el escurrimiento es un fenómeno distinto de la escorrentía, toda vez que esta última se realiza por medio de un flujo laminar sobre la superficie (Rodríguez, 1975) y el agua que fluye por estos adquiere características hidrológicas, químicas y biológicas que reflejan el clima, la geología y la cubierta vegetal del territorio que éstos drenan.

Para el manejo de los datos obtenidos se hizo uso de los sistemas de información geográfica (SIG) que son herramientas para el análisis de datos espaciales, se han desarrollado a la par de la tecnología dado que la evolución en la capacidad de las computadoras para el manejo y procesamiento de una gran cantidad de datos facilita su uso en equipo personal y no requiere de enormes procesadores, además que opera con una serie de subsistemas dentro de un gran sistema, dado que el SIG distribuye datos en espacio y tiempo emplea hardware que consiste principalmente de una unidad central, con discos de almacenamiento, además de varios periféricos de entrada de datos y despliegue visual, un software apropiado y los recursos humanos, esta tecnología permite adoptar a su vez nuevas tecnologías e integrarlas para analizar procesos ecológicos, dispersión de fauna, uso de hábitat, análisis de paisaje, composición de comunidades, además del análisis de información técnica, mantenimiento para llevar a cabo políticas de prevención, control, ordenamiento y manejo (Navarro y Legorreta, 1998; Demers, 2000).

## ÁREA DE ESTUDIO

### Ubicación geográfica

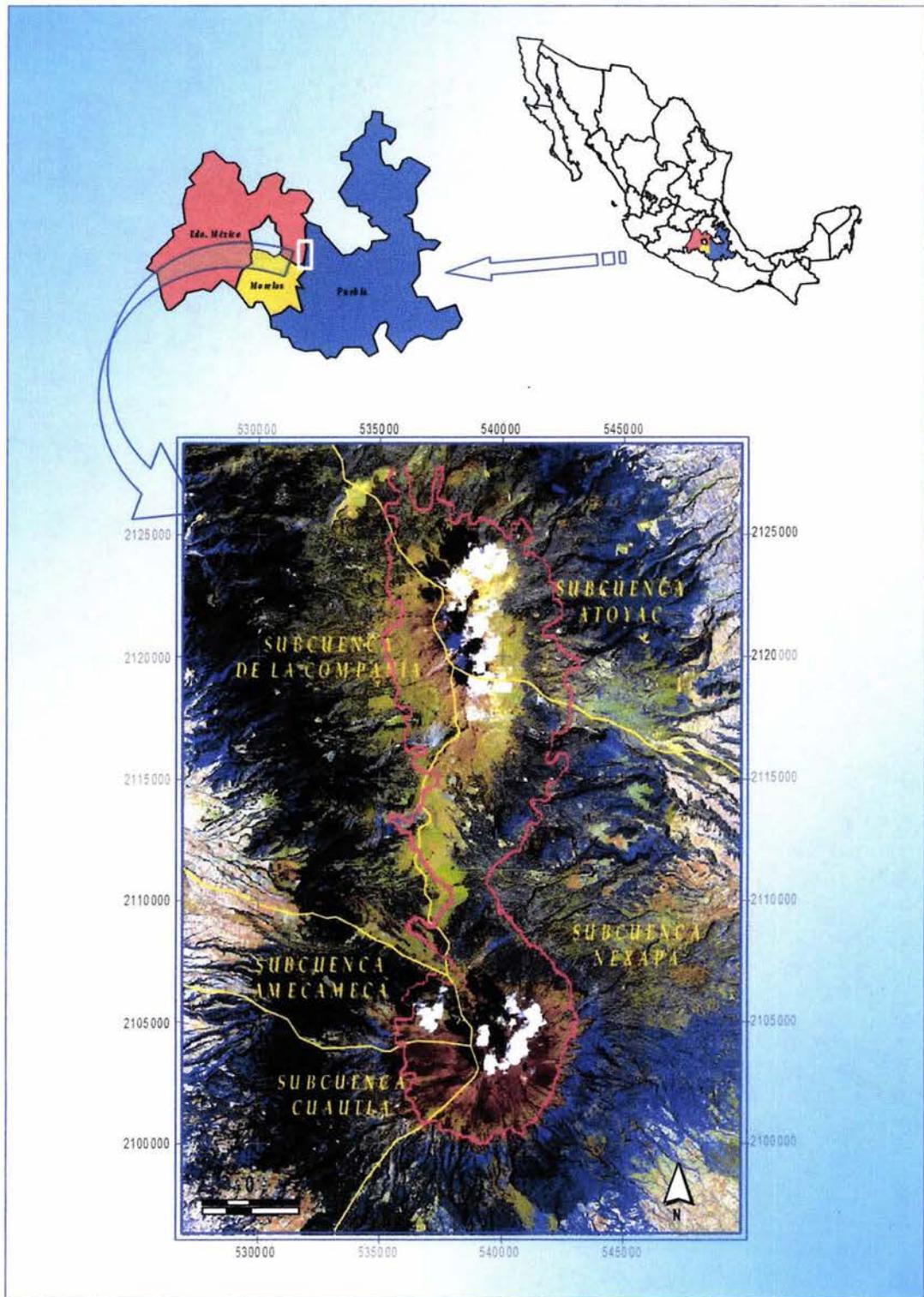
El Parque Nacional Izta-Popo se localiza geográficamente entre los meridianos de coordenadas 98° 35' 00'' y 98° 42' 40'' longitud Oeste (UTM: 516 287 y 554 048) y entre los paralelos de 19° 15' 30'' y 18° 59' 00'' latitud Norte (UTM: 2 136 024 y 2 095 468). Dicha área está descrita en las cartas temáticas de INEGI escala 1: 50 000, denominadas: Amecameca, E14-B41; Huejotzingo, E14-B42; Cuautla, E14-B51 y Atlixco, E14-B52, Tepalcingo de Hidalgo, E14-B61 e Izúcar de Matamoros E14-B62. (mapa 1).

Políticamente se encuentra bajo jurisdicción de los Municipios de: Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatzingo en el Estado de México; San Salvador el Verde, Domingo Arenas, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco en Puebla; así como en Tetela del Volcán en el Estado de Morelos (SEDUE, 1986).

El Parque Nacional presenta un intervalo altitudinal que va de los 3 600 a los 5 452 metros sobre el nivel del mar (Vargas, 1997). El Iztaccíhuatl (tercera montaña de México por su altitud, con varias etapas de erupción), se encuentra al norte del Popocatepetl, a 70 km al sureste de la Ciudad de México; tiene una longitud de 7 km de los cuales 6 están cubiertos por nieves perpetuas. Presenta de noreste a sur tres eminencias: "la cabeza" se eleva a 5 146 m, "el pecho" a 5 280 m y "los pies" a 4 740 m, no se aprecian formas precisas equivalentes a centros de erupción, en apariencia han sido transformadas por la erosión. En sus laderas escarpadas se llevan a cabo intensos procesos erosivos y se le atribuye una edad cuaternaria (Lugo, 1984).

El Popocatepetl es un estratovolcán con un cono de piroclastos, por su altitud (5 542 m) es la segunda montaña de México y forma con su cima el punto extremo sudoriental del parteaguas de la cuenca de México. Es por su juventud, dimensiones, actividad actual, localización y condiciones climáticas, una de las formas del relieve volcánico más interesantes de México, ocupa el extremo sur de la Sierra Nevada a una distancia de 88 km al sureste de la Ciudad de México, en su cresta se encuentran dos cimas elevadas: "El espinazo del Diablo" a 5 247 m sobre el nivel del mar y "El Pico Mayor" a 5 452 msnm (SARH, 1992). El cono volcánico se eleva unos 1 500 msnm sobre su base, con pendiente fuerte de unos 33° hacia la porción superior, en gran parte cubierta de nieve y hielo. Su cima posee un cráter amplio de forma elipsoidal, con ejes de aproximadamente 600 por 400 m, el mayor orientado al noreste. Según Lugo (1984), la petrología del volcán la describieron en 1895, Aguilera y Ordoñez como basalto labradórico en la parte inferior del volcán, y traquitas de hiperstena en la parte media, rodeando al volcán, y triquitas en las crestas del Ventorrillo y el Cerro Tlamacas.

En cuanto a su fisiografía el Iztaccíhuatl y Popocatepetl, junto con la Sierra del Río Frío, separan las cuencas de México y Puebla, han ejercido una influencia muy grande al modificar bruscamente el relieve y por lo tanto, el clima, lo que va también ligado al régimen hidrológico, los suelos, la vegetación y la actividad humana (Lugo, 1984).



**Mapa 1.** Ubicación del área de estudio, Parque Nacional Iztá-Popo y su zona de influencia

El Iztaccíhuatl se une al sur con el Popocatepetl, por medio de un amplísimo Puerto denominado "Paso de Cortés", que en su parte media alcanza los 3 700 msnm. El Iztaccíhuatl consta de una plataforma que se levanta bruscamente sobre las planicies de Chalco y Amecameca, surcada por profundas barrancas. Destaca el cuerpo principal de la montaña que se eleva sobre la plataforma y constituye el remanente cubierto de nieve y que semeja la forma de una mujer acostada, con los pies hacia el sur (SEDUE, 1986). Por su parte el Popocatepetl presenta una morfología sencilla, un gran cono elíptico con pendientes acentuadas al este y oeste y de perfil más suave hacia el sur.

Los tipos de suelos aflorantes en esta zona son el Regosol dístico, los Litosoles, el Andosol mólico y el Cambisol eútrico; y según la clasificación de suelos FAO, en el Parque se encuentran Andosoles, Litosoles y Regosoles. Los Andosoles vítricos (gruesos), se localizan entre los 3 100 a 3 800 y 4 200 msnm, Litosoles con Regosoles dísticos en la cumbre del Iztaccíhuatl y Regosoles dísticos con Litosoles en zonas superiores a los 4 000 msnm (SEDUE, 1986; Vargas, 1997).

## Clima

Los niveles de altitud en los que se sitúa el Parque, permiten una variación altitudinal del clima, de muy frío en las partes más elevadas a templado en las más bajas. Esto influye de manera directa en el paisaje: la temperatura, el viento y la precipitación, son determinantes en la fisonomía de la vegetación, en el grado de intemperismo de las rocas y el desencadenamiento de ciertos procesos geomorfológicos (Rojas, 2001).

García (1973) define estos tres tipos de clima para la zona:

- EFHw (muy frío), que se presenta en las partes más elevadas de los altos picos a una altitud superior a los 5 000 msnm, con condiciones glaciares y periglaciares, este último con la variante ETHwi (clima frío) de los 4 000 a 5 000 msnm.
- C(w2)b, (templado) se distribuye de manera radial a los volcanes y es la transición entre los fríos y los templados, hasta una altura aproximada de 4 000 msnm.
- C(w2), (templado) se presenta en las partes más bajas de la zona y es la transición hacia los climascálidos.

## Flora y Fauna

La vegetación del Parque Nacional se encuentra relacionada con los pisos altitudinales de los mismos, el límite de la vegetación arbórea en estos volcanes se ubica en una altitud de 4 000 msnm. Florísticamente se distinguen 3 pisos fundamentales de vegetación:

- 1) Pinar abierto de *Pinus hartwegii* (3300-4300 msnm) con abundantes gramíneas amacolladas, el bosque en altitudes más bajas se mezcla con abetos y aile.
- 2) Pradera subalpina (zacatonal alpino) (3800-4300 msnm).
- 3) Pradera alpina (vegetación de páramo de altura, 4000-5000 msnm) (SEDUE, 1986).

De acuerdo con Vargas (1997), la vegetación que se encuentra en el estado de Morelos es predominantemente bosque de pino constituida por *Pinus hartwegii*, *P. ayacahuite*, *P. pseudostrobus*, *P. macrocarpa*, *Abies religiosa*, *Cupressus lindleyi*; en sitios de mayor altitud (2 700 a 3 200 msnm) se localiza el *Pinus oocarpa*; en altitudes de 3 000 a 3 500 msnm se localiza la siguiente vegetación: *Pinus lawsoni*, *P. leiophylla*, *P. oocarpa*, *P. pringlei*, *P. teocote*; así como las especies de encino: *Quercus mexicana*, *Q. crassipes*, *Q. rugosa* y *Q. macrophylla*, otras especies presentes de árboles forestales: *Clethra mexicana*, *Arbutus xalapensis*, *A. glandulosa*, *Arctostaphylos arguta*, *Buddleia cordata*, *B. americana* y *Dodonaea viscosa*. En altitudes de 3 200 a 4 250 msnm se encuentra vegetación herbácea como: las gramíneas *Muhlenbergia*, *Sporobolus*, *Festuca* y *Stipa*; también son frecuentes las dicotiledóneas como *Lupinus* y *Penstemon*, a partir de los 4 250 msnm de altitud se inicia la vegetación de pastizal alpino y las nieves perpetuas. En el estado de México dominan: *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis*, *P. teocote*, *P. leiophylla*, *Quercus laurina*; otras especies son: *Cornus disciflora*, *Garrya laurifolia*, *Ilex toluicana*, *Meliosa dentata*, *Oreopanax xalapensis* y *Prunus brachybotrya*. Vegetación de zacatal: *Festuca toluensis*, *F. livida*, *F. amplissima*, *Calamagrotis toluensis*, *Muhlenbergia quadridentata*, *Trisetum spicatum*, *Agrostis toluensis* y *Poa orizabensis*. Del Estado de Puebla se puede mencionar que existen Bosques de Oyamel, de Pino, de Pino-encino y zacatal, alguna especie representativas de estos bosques son: *Abies religiosa*, *Pinus ayacahuite*, *P. leiophylla*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis*, *P. hartwegii*, *Quercus rugosa*, *Q. crassipes*, *Q. laeta*, *Q. castanea*, *Q. laurina* y otras asociadas como *Salix oxylepis*, *Garrya laurifolia*, *Alnus mexicana*, *A. jorullensis*, *Cupressus lindleyi* y *Prunus serotina*, entre otras.

Según Chávez y Trigo (1996), desde el punto de vista zoogeográfico, el parque es un punto de contacto y de transición entre fauna neoártica y neotropical. La historia evolutiva de la fauna en el Valle de México y por lo tanto de la Sierra Nevada donde se localiza el Parque Nacional Izta-Popo, ha tenido una influencia notable por las características fisiográficas propias de esta Provincia Biótica.

La fauna posee características particulares tales como su adaptación al clima frío, vivir entre zacatonales y bosques de pino, además de establecerse a grandes altitudes.

La cordillera neovolcánica, en su conjunto, es pobre en cuanto a su fauna, aunque es notable la presencia de especies relictuales y endémicas como *Romerolagus diazi* (teporingo) y *Neotomodon* sp. (ratón de los volcanes). Además existen otros mamíferos como musarañas (género *Sorex*), conejos (género *Sylvilagus*), ardillas (*Spermophilum mexicanus* y *Sciurus aureogaster*), coyotes (*Canis latrans*) y armadillos; entre las aves se encuentran *Accipiter striatus* (gavilán), *Coragyps atratus* (zopilote), *Myiarchus tuberculifer* (copetón común). Las lagartijas y víboras de cascabel destacan entre otros (SEDUE, 1986).

Dentro del parque existe un pequeño asentamiento humano con fines recreativos y de pesca, sin embargo en las zonas aledañas se manifiesta el crecimiento demográfico teniendo un impacto importante sobre el área protegida (Vargas, 1997).

El principal objetivo de este Parque Nacional es: proteger su suelo contra la degradación, manteniendo y restaurando sus bosques y praderas, como garantía del buen clima de las ciudades vecinas. Para lograr dicho objetivo, es necesario contar con el diagnóstico del estado de conservación de los recursos, el uso y servicios ambientales que se ofrecen, conocer el impacto ocasionado por la influencia antropogénica en busca del manejo integral del ecosistema.

De lo anterior y tomando en cuenta que el conocimiento sobre los recursos hídricos con los que cuenta el país es aún limitado y la información hidrológica reportada es muy general con relación a las Áreas Naturales Protegidas, incluyendo la referente al Parque Nacional Izta-Popo, permite justificar la generación de información sobre el estado actual de las corrientes acuáticas y su calidad, lo cual permitirá en un futuro lograr un mejor manejo, conservación y planeación sobre el uso y aprovechamiento del agua en la zona; además de actualizar los mapas que hasta el momento existen sobre algunos cauces del área de estudio y contribuir al favorecimiento en su papel de Reserva Natural en la conservación del ecosistema.

## OBJETIVO GENERAL

Evaluar la calidad del agua de los principales escurrimientos, en el Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia, durante el período comprendido entre julio del 2001 a septiembre del 2002.

## OBJETIVOS PARTICULARES

1. Determinar la calidad del agua de las corrientes por subcuencas en función de los siguientes parámetros :

a) Físicos y químicos

- Temperatura ambiente
- Temperatura del agua
- pH
- Conductividad
- Sulfatos
- Sulfuros
- Alcalinidad total
- Dureza total y de calcio
- Carbono orgánico particulado
- Materia orgánica en sedimento
- Oxígeno disuelto

b) Hidrológicos

- Tipo de escurrimiento
- Aforo de corriente (Q)
- Velocidad de corriente

2. Comparar la calidad del agua de las cinco subcuencas que conforman el Parque.

3. Comparar y analizar la variación de la calidad del agua a lo largo de dos de los principales escurrimientos del sistema hidrológico Izta-Popo.

4. Establecer en el mapa de la zona mediante el sistema ARC VIEW (versión 3.2), la red de puntos muestreados y registrar sus características en cuanto a calidad del agua.

## MÉTODOS

Los métodos utilizados para la realización de este trabajo se dividieron en cuatro fases:

### Fase inicial:

Se llevó a cabo una recopilación de información bibliográfica, cartografía digitalizada (1: 50 000) INEGI y fotografías aéreas sobre los sistemas hidrológicos del área identificando al interior del Parque y zonas aledañas: los escurrimientos intermitentes y perennes.

### Segunda fase:

Se llevó a cabo en campo, donde se tomaron muestras de agua y sedimento de sistemas hídricos en el periodo de julio del 2001 – septiembre del 2002 y se determinó la ubicación de cada punto de muestreo mediante un Sistema de Posición Global (Global Position System, GPS), anotando su altitud y coordenadas geográficas en unidades UTM.

En el sitio se registraron los siguientes parámetros:

La temperatura se midió con un termómetro de mercurio de  $\pm 0.1$  °C de precisión, en cada punto de muestreo se registraron las temperaturas tanto del ambiente como del agua.

El oxígeno disuelto se cuantificó con un oxímetro (YSI 52 Dissolved Oxygen Meter – digital- modelo # 52C), siguiendo las indicaciones del fabricante. Este método de electrodo de membrana se basa en la tasa de difusión del oxígeno molecular a través de una membrana (APHA-AWWA-WPCF, 1992; ASTM, 1991; Hammer, 1996; Winkler, 1986), y para efecto de conocer la concentración del parámetro es un método rápido, confiable y de fácil manejo en campo.

La conductividad y el pH se midieron por medio de un potenciómetro digital (Conductronic PC18), al igual que la temperatura como una verificación de la medida con el termómetro.

La Conductividad eléctrica, se midió por medio de un conductímetro de lectura directa en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La conductividad leída es igual a la conductividad eléctrica de la muestra leída entre caras opuestas de un cubo de 1 cm (Arredondo y Ponce, 1998; ASTM, 1991; Romero, 1999).

El pH se determina mediante el método electrométrico utilizando un electrodo del sensor. El principio básico de la determinación electrométrica del pH es la medida de la actividad de los iones hidrógeno por mediciones potenciométricas utilizando un electrodo patrón de hidrógeno y otro de referencia (APHA-AWWA-WPCF, 1992; Jiménez, 2002; Romero, 1999).

La toma de muestras de agua para los parámetros a determinar se realizó de forma manual de acuerdo a lo establecido en APHA-AWWA-WPCF (1992).

Las muestras de agua se conservaron en botellas de polietileno de 500 ml, las destinadas para el análisis de sulfuros en botellas de polietileno de 250 ml a las cuales se les añadió conservador (acetato de zinc), las de carbono orgánico particulado en frascos de vidrio ambar de 100 ml y las muestras de sedimento en recipientes de plástico, todas estas fueron transportadas en una hielera a una temperatura menor a los 4°C para analizarlas en el laboratorio (APHA-AWWA-WPCF, 1992).

Para obtener los datos que posteriormente permitieron calcular el aforo y la velocidad de la corriente se utilizó el método sección y velocidad, la cual consiste en calcular separadamente la sección o área transversal de la corriente (registrando profundidades con regla o flexómetro a cada 10 o 20 cm de distancia en el ancho del caudal); y la velocidad se determinó marcando una distancia fija entre dos puntos de referencia, en el primero de ellos se liberó un cilindro de plástico (flotador) aproximadamente a la mitad de la corriente registrando el tiempo de recorrido al segundo punto de referencia (esto se realizó de 5 a 10 veces), finalmente se calculó el gasto por medio de la velocidad y el área transversal (Aparicio, 1994; Lind, 1985; Wetzel, 2001).

#### Tercera fase :

En el laboratorio se determinaron los siguientes parámetros :

La alcalinidad, se midió por el método volumétrico mediante indicadores. Esta medida corresponde principalmente a los hidroxidos, carbonatos y bicarbonatos de los iones calcio, magnesio, sodio, potasio, amonio, los más comunes son los de calcio y magnesio; otros, usualmente menores, que contribuyen a la alcalinidad son las bases conjugadas de ácidos fosfórico, silícico, bórico y orgánicos (Jiménez, 2002 ; Manahan, 2001 ; Romero, 1999; Snoeyink y Jenkins, 1990).

Como parámetro de medida de ciertos cationes importantes presentes en muestras de agua natural, a menudo se utiliza el índice de dureza, el cual mide la concentración total de iones calcio y magnesio (método complejométrico o titulométrico de EDTA), que son las dos especies principales responsables de la dureza del agua. Experimentalmente, se determinó valorando una muestra de agua con EDTA, que es una sustancia que forma complejos muy fuertes con iones metálicos, excepto con los metales alcalinos (Baird, 2001; Hammer, 1996).

La dureza total es la medida del calcio y el magnesio expresados como equivalentes de carbonato de calcio. La técnica implica la titulación del calcio y el magnesio con la sal EDTA, para formar un complejo color rojo vino con los iones de calcio y magnesio. Cuando todos los iones han sido completados con el EDTA, el color de la solución se torna azul (Arredondo y Ponce, 1998).

Para conocer la concentración del ion sulfato se utilizó el método turbidimétrico, el cual puede aplicarse a concentraciones de hasta 60 mg/l, se basa en la precipitación del ión sulfato en un medio ácido (HCl) con cloruro de bario ( $BaCl_2$ ), en presencia de cloruro de sodio, de modo que forma cristales de sulfato de bario ( $BaSO_4$ ) de tamaño uniforme. La absorbancia luminosa de la suspensión del sulfato de bario formado, se mide con un nefelómetro o espectrofotómetro, la absorbancia de esta suspensión se lee a 340 nm y la concentración se estima por medio de una curva estándar (APHA-AWWA-WPCF, 1992 ; Arredondo y Ponce, 1998 ; Romero, 1999).

Para conocer la cantidad de sulfuros en las muestras de agua se utilizó el método yodométrico. Este método se efectúa a partir de una titulación basada en la reacción del yodo con el sulfuro en solución ácida, oxidándolo hasta azufre. Después de la acidificación de la muestra, los sulfuros son desplazados en forma de  $H_2S$  y recogidos en una solución de acetato de cinc. El yodo utilizado en exceso reacciona con la suspensión de sulfuro de cinc en ciertas condiciones de acidez. El exceso de yodo, valorado con una solución de tiosulfato sódico, permite calcular la cantidad de sulfuros, superiores a 1 mg/l, de un modo preciso (APHA-AWWA-WPCF, 1992 ; Rodier, 1990).

La técnica utilizada para determinar el contenido de materia orgánica en el sedimento consistió en la oxidación húmeda (método titulométrico), donde el valor de dicromato que reacciona con la materia orgánica en una solución altamente ácida es determinado por titulación. Ésta técnica desarrollada por Walkley y Black es un procedimiento indirecto por medio del cual se determina el carbono de la materia orgánica, por ser un elemento relativamente constante en ella. En la cuantificación del parámetro, el 77% del carbono total de la materia orgánica es oxidado y se obtiene una aproximación muy aceptable del contenido de materia orgánica del sedimento, considerando que teóricamente la proporción de carbono orgánico en ésta es del 58% (Reyes, 1996).

La materia orgánica particulada se filtró sobre fibra de vidrio para determinarse mediante la técnica espectrofotométrica. El contenido de carbono se determinó por oxidación con una mezcla de dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado. La disminución en extinción del color amarillo de la solución de dicromato, fue resultado de la reducción de la materia orgánica, medida espectrofotométricamente. La composición promedio del fitoplancton y detritus particulado es tal que el verdadero contenido de carbono esta entre el 10 y el 20 % del valor de oxidación obtenido por este procedimiento. De este modo, el carbono oxidable pudo ser interpretado, en efecto, como la medida de la energía almacenada en una muestra del material orgánico particulado (Parsons *et al.*, 1984; Wetzel y Likens, 1991).

En cuanto a los datos hidrológicos para determinar el orden de cada una de las corrientes o cauces, en donde se encuentran los puntos de muestreo, se utilizó la técnica de Horton-Strahler que menciona Wetzel (2001) y Torres y García (1995) por ser la más utilizada, tomando como base para identificarlos, las cartas hidrológicas digitalizadas del INEGI (E14-B31, E14-B32, E14-B41, E14-B42, E14-B51 y E14-B52, escala 1:50000) que corresponden al área de estudio y el programa ARC VIEW versión 3.2. En ésta técnica

cada cauce que se origina como un torrente en la cabecera de la cuenca es designado como de primer orden. La unión de dos tributarios de primer orden produce una corriente de segundo orden. Cuando ésta a su vez se une con otra corriente de segundo orden se produce una de tercer orden y así sucesivamente. Cuando dos tributarios del mismo orden se unen aumenta el orden de corriente, no obstante, éste no cambia por la adición de una corriente de orden inferior (Torres y García, 1995).

#### **Cuarta fase:**

En ésta última etapa se elaboró una base de datos, la cual se organizó y analizó estadísticamente por medio de una correlación múltiple, con el fin de saber hasta que grado se relacionan los parámetros; posteriormente se analizaron por subcuencas haciendo uso de gráficas de área, barras y línea de cada parámetro, y compararlas entre sí con ayuda de diagramas de caja. Después de lo anterior se escogió dos de los sistemas más importantes (con registro a lo largo de su cauce), para comparar la variación de la calidad del agua. Finalmente la base de datos dividida por subcuencas se relacionó con las cartas hidrológicas digitalizadas, ubicando los puntos de muestreo en un mapa generado con el programa ARC VIEW versión 3.2.

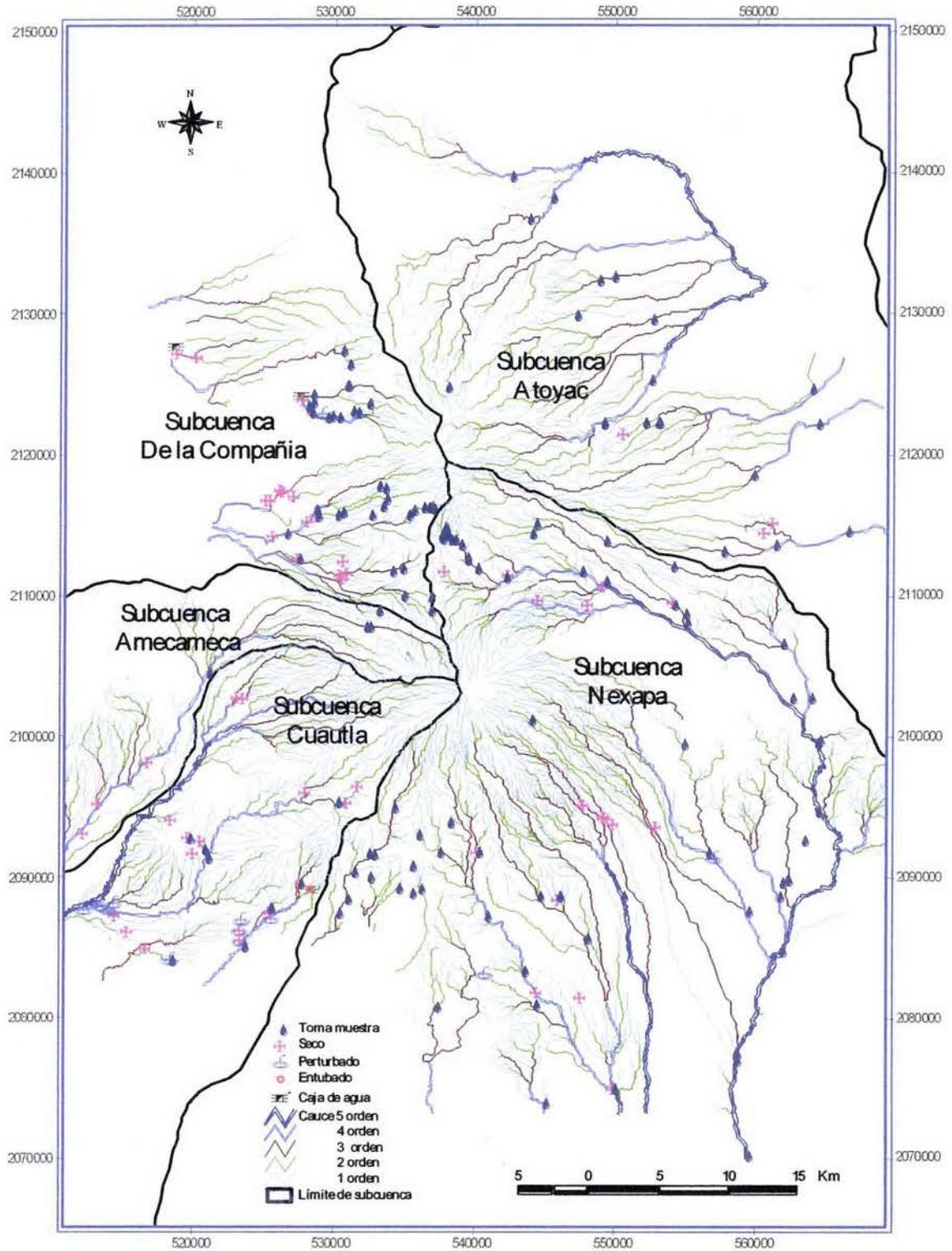
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los resultados de este trabajo se tienen ubicados dentro del área de estudio (mapa 2) un total de 216 puntos de monitoreo, los cuales se encuentran distribuidos como muestra la siguiente tabla:

Tabla 1. Distribución de los diferentes puntos de monitoreo dentro de las dos cuencas delimitadas dentro del Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl.

CUENCA	SUBCUENCA	ÁREA TOTAL (SUBCUENCA Km <sup>2</sup> )	ÁREA DE MONITOREO (Km <sup>2</sup> )	PUNTOS DE MONITOREO	PUNTOS CON MUESTRA DE AGUA	PUNTOS PERTURBADOS SIN MUESTRA DE AGUA	PUNTOS SECOS	ENTUBAMIENTOS	CAJAS DE ALMACENAMIENTO DE AGUA
	ATOYAC	1971	695	23	20	-	3	-	-
BALSAS	NEXAPA	3307	1317	87	68	2	17	-	-
	CUAUTLA	943	306	40	12	9	16	2	1
	AMECA	546	121	8	5	-	3	-	-
MÉXICO	DE LA COMPAÑÍA	2566	316	58	38	1	16	1	2
	TOTALES	9333	2755	216	143	12	55	3	3

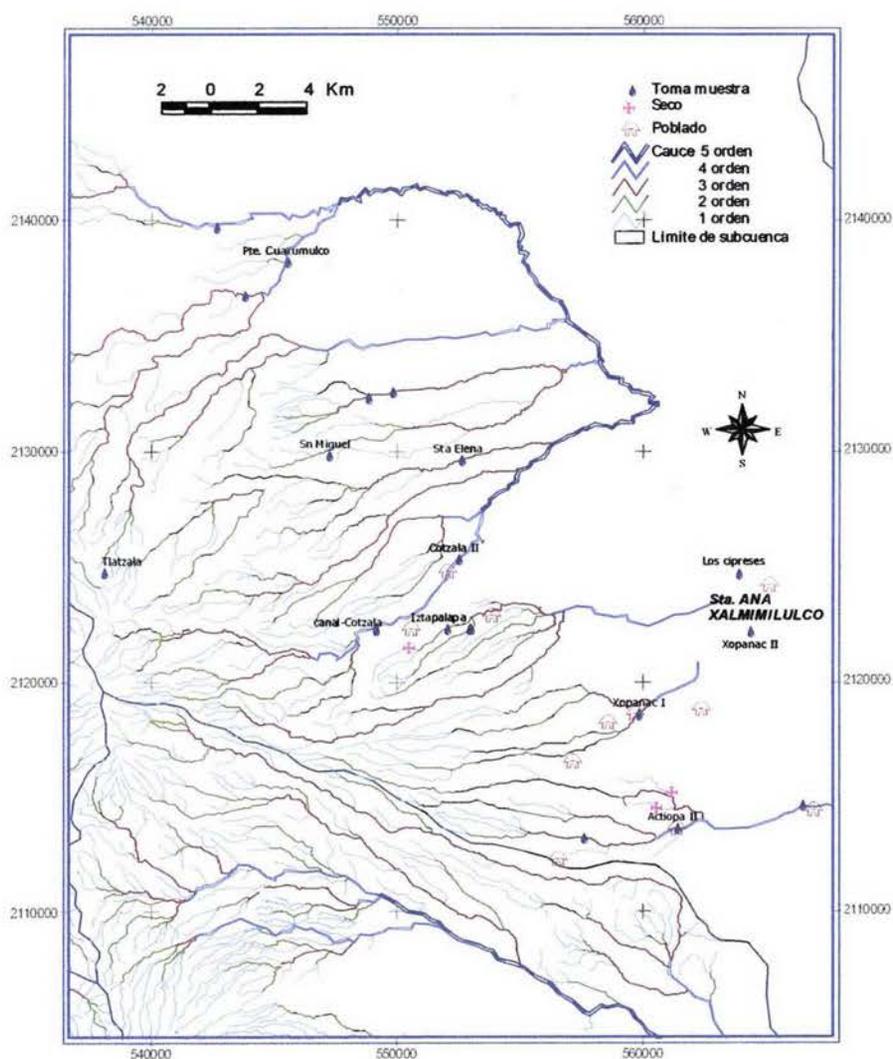
De lo anterior se consideraron los datos de los puntos con muestra de agua para realizar un análisis de correlación múltiple (ver tabla 2 del anexo) con la finalidad de tener una visión general del comportamiento entre parámetros, lo que dió como resultado que la mayoría de ellos presentan una relativa correlación con valor de probabilidad menor al 0.8. De los parámetros que presentan una mayor afinidad se encuentran alcalinidad total, conductividad, dureza total, de calcio y sulfatos, el aforo con el orden, velocidad y sulfatos; de los que presentan relación inversa son el oxígeno con la temperatura del agua, la altitud con temperatura del agua, la ambiental y alcalinidad, en tanto que pH, materia orgánica y carbono orgánico particulado no presentan relación directa ni inversa con ningún otro parámetro lo mismo sucede entre los sulfuros y sulfatos. Dado que lo anterior da una noción general de comportamiento en el área de estudio y puesto que existen ligeras diferencias entre subcuencas a continuación se muestra el análisis por parámetro de cada una de ellas.



Mapa 2. Distribución de los puntos de monitoreo en las cinco subcuencas del Parque Nacional Izta-Popo.

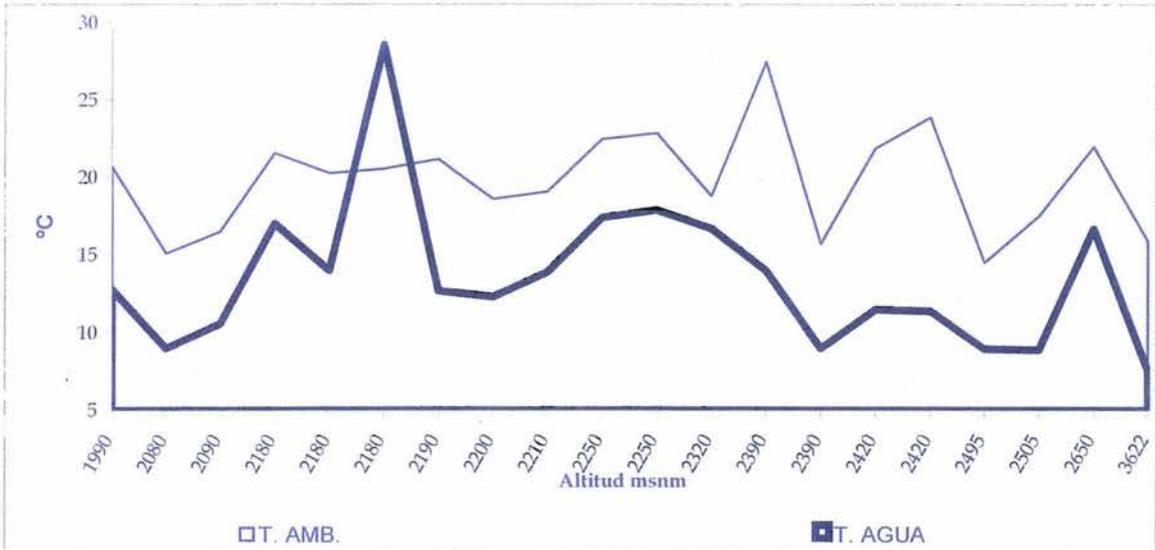
## SUBCUENCA ATOYAC

Los ríos San Martín y Zahuapán unidos se les conoce con el nombre de Atoyac poblano. El Atoyac toma una dirección hacia el sur, pasa cerca de Puebla, después se une al Río Mixteco y la corriente producida por esta unión toma el nombre de Río Mezcala, que posteriormente se conoce como Río de las balsas. Chávez y Trigo (1996), describen la subcuenca desde el norte del Iztaccihuatl que vierte sus aguas hacia la población de San Martín Texmelucan, Puebla (mapa 3). Aquí se origina el Río Atoyac que recibe el nombre de este poblado, por lo que es conocido como Río San Martín. Esta porción se caracteriza por lo accidentado de su topografía y el grado de pendiente de los cauces de sus corrientes (INEGI, 2000). Al igual que en las otras subcuencas, los recursos hídricos que aquí se generan se canalizan para el riego o para el abastecimiento de los poblados cercanos.



Mapa 3. Ubicación de los puntos de monitoreo en la subcuenca Atoyac.

## TEMPERATURA



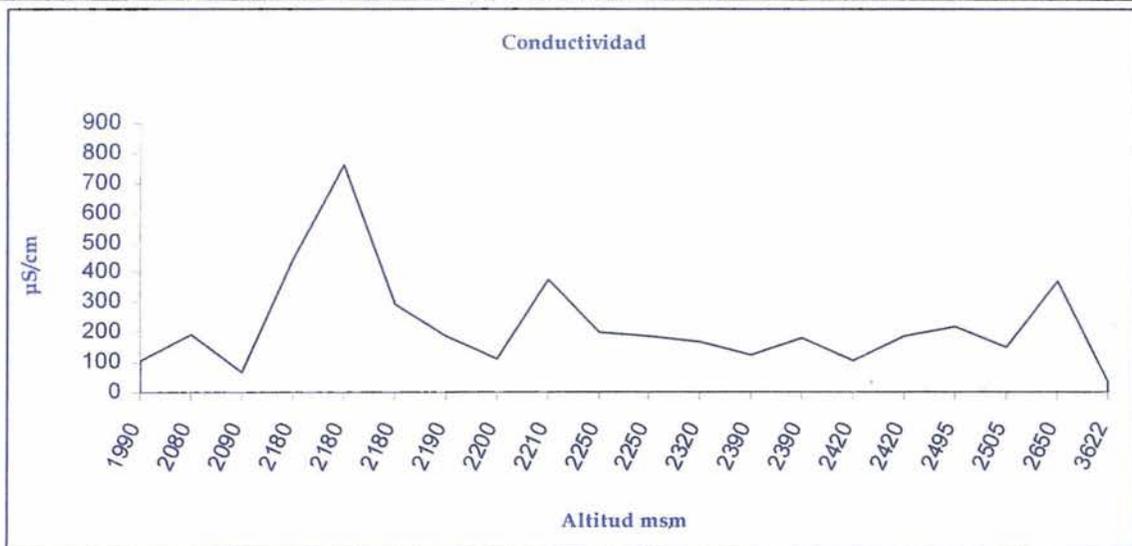
Gráfica 1. Comparación térmica con respecto a la altitud de los puntos correspondientes a la subcuenca Atoyac.

En la gráfica 1 se presentan los datos obtenidos de la temperatura del agua (7.6 a 28.6 °C) y de la temperatura ambiente (15.1 a 27.5 °C).

De manera general, se observa un comportamiento similar para ambas temperaturas, en donde la del ambiente siempre es mayor a la del agua, sin embargo a altitudes mayores a 2250 msnm este comportamiento va cambiando debido a la alta capacidad calorífica del agua que se calienta lentamente, además de que en esas zonas existe un mayor número de escurrimientos provenientes del deshielo que se van mezclando antes de los puntos de muestreo (mapa 3) y la agitación causada por la velocidad de las corrientes permiten una mayor liberación de calor hacia el ambiente, además de la influencia de la estación del año en que se tomó la muestra. En cuanto a las altitudes inferiores a 2250 msnm dicha similitud es mayor a causa de un almacenamiento calórico mas estable y la única excepción la presenta el punto denominado Los Cipreses (2180 msnm), en donde la temperatura del agua (28.6 °C) supera a la temperatura ambiente, de acuerdo a las observaciones realizadas en campo, se debe a la presencia de una industria textil en el poblado de Sta. A. Xalmimilulco que utiliza el agua del cauce para enfriamiento y lavado de sus productos vertiendo el agua de desecho a éste, sin darle un tratamiento previo, provocando un efecto de alteración térmica.

## CONDUCTIVIDAD

Los valores que se presentan en la gráfica 2, indican variaciones en casi todos los puntos, siendo el valor más bajo de 37  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y el máximo de 764  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en donde la mayoría se encuentra en el intervalo de 100 a 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Dichas fluctuaciones son más evidentes en las altitudes bajas ya que presentan cierto grado de mineralización y carga iónica; aunque en algunos puntos existe tendencia a la acumulación de sales y minerales disueltos, ya que altos valores de alcalinidad y dureza coinciden con altas conductividades (lo que se corrobora con el análisis de correlación), en comparación con el resto de los datos.

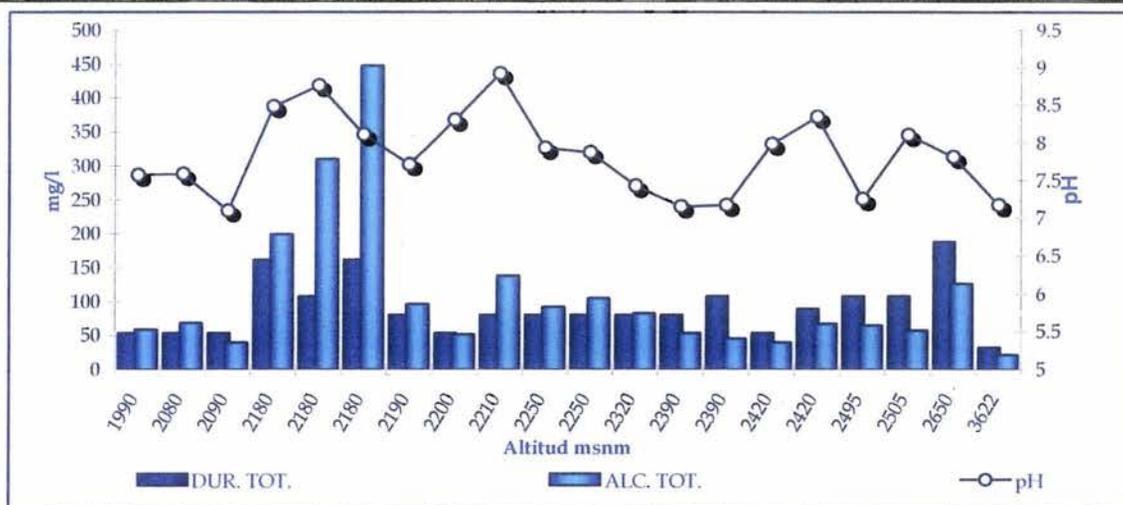


Gráfica 2. Comportamiento de la conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) a lo largo del gradiente altitudinal en la subcuenca Atoyac

Se registraron cuatro puntos con concentraciones mayores a  $300 \mu\text{S}/\text{cm}$ , uno de ellos es Xopanac II (2180 msnm), que presenta el valor más alto en donde las cantidades de calcio y bicarbonato son debidas en gran parte al aporte de desechos domésticos y sobre todo de las industrias textiles que se encuentran en el poblado cercano (Sta. A. Xalmimilulco); el aumento de sales disueltas e incremento de la conductividad en los otros tres puntos, Cuaxumulco (2180 msnm), Sta. Elena (2210 msnm) y Cotzala II (2650 msnm), son consecuencia del aporte de los escurrimientos que se incorporan antes del punto de muestreo y que en sus aguas arrastran sustancias provenientes de la erosión en zonas más altas al sitio de muestreo, además de los aportes de desechos domésticos.

### ALCALINIDAD, DUREZA TOTAL, DUREZA DE CALCIO Y pH

La alcalinidad que se registra (gráfica 3) es en general baja de 21.08 a 138 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ , aunque en algunos puntos como Cuaxumulco (199.3 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ), Xopanac II (310.5 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ) y Los Cipreses (448.5 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ), los tres a la altitud de 2180 msnm, presentan concentraciones relativamente altas, en donde los dos últimos rebasan el límite máximo que presentan las aguas naturales, de 20 a 200 mg/l (Lind, 1985), debido a un aporte extra de sales provenientes de los poblados cercanos y principalmente de la pequeña industria textil cercana a Los Cipreses cuya agua es utilizada para los procesos de enfriamiento y tinción. Pese a lo anterior, los valores de este parámetro en la subcuenca indican que la capacidad de autopurificación y amortiguamiento de los sistemas se encuentran en buenas condiciones, ya que la mayoría de los puntos se encuentran dentro del límite arriba mencionado.



Gráfica 3. Relación de alcalinidad total (mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ), dureza total (mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ) y pH, con respecto a la altitud en la subcuenca Atoyac.

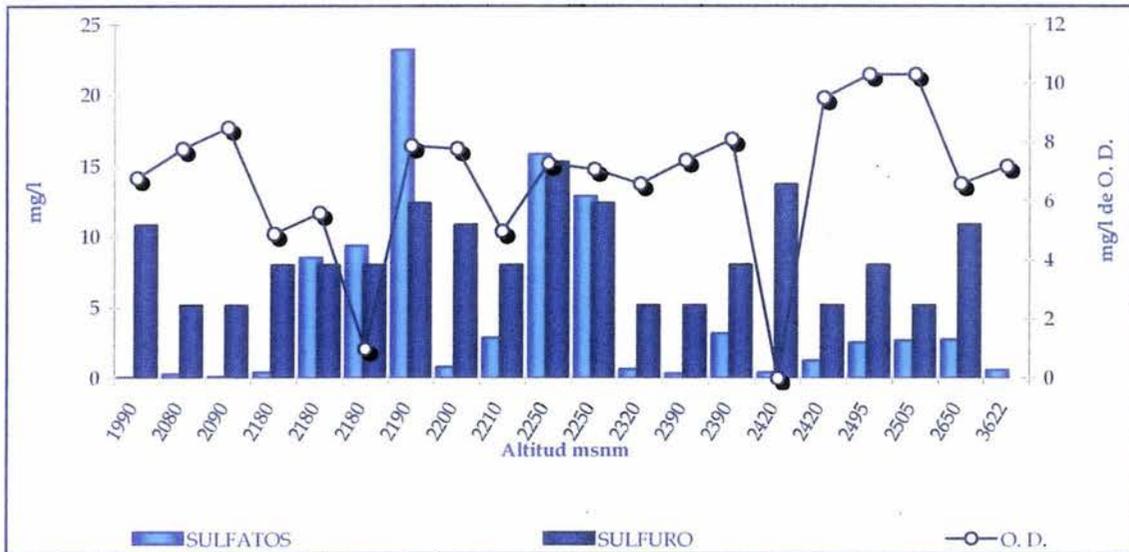
El intervalo de dureza total que se presenta varía de 32.28 a 188.31 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , y su comportamiento se ve influido conforme a la altitud, por el grado de erosión en cada sitio, generando aguas moderadamente duras en las zonas de altitud mayor a 2390 msnm, mientras que en altitudes menores a los 2320 msnm disminuye el grado de dureza y aumenta la alcalinidad. Todos estos datos se encuentran dentro de los límites que establecen las Normas Oficiales Mexicanas para aguas naturales, y la mitad de ellos tienen concentraciones menores a la alcalinidad, por lo que presenta una dureza de tipo carbonatada en donde existen más iones carbonato y bicarbonato de los necesarios para satisfacer los iones metálicos divalentes ( $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) causantes de la dureza, este exceso está asociado, según Martínez (1998) y Romero (1999), a otros iones monovalentes; mientras que en el 50% restante, los iones calcio y magnesio se encuentran ligados además a otros elementos como el sulfato, estos sitios se ubican principalmente en las partes más altas de la zona donde hay una mayor influencia de la actividad volcánica. Aunado a lo anterior la influencia antropogénica es notoria ya que al agua utilizada para la industria mencionada en los puntos de mayor concentración, no se le da un previo tratamiento antes de verterla nuevamente al sistema, presentando Cuaxumulco, Xopanac II y los Cipreses aguas duras.

Con relación a la dureza de calcio se presentan concentraciones que oscilan de 5.38 a 170.38 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , predominando en el 55% de los puntos el ion calcio y en el resto además de éste existe magnesio; éste último es más abundante en San Miguel (2090 msnm), Actiopa II (2250 msnm) y Xopanac I (2250 msnm), procedente del acarreo o disolución de rocas ígneas, comunes en la zona, ricas en este ion y cuyos compuestos son mucho más solubles que los de calcio, produciéndose en raras ocasiones la precipitación de cantidades significativas de magnesio.

En la subcuenca, la presencia y predominio del ion bicarbonato es inminente (los valores fluctúan de 7.11 a 8.93 de pH), el 40% de los puntos presentan tendencia a la neutralidad en donde se registran trazas de concentraciones de  $\text{CO}_2$  disuelto debido a procesos respiratorios de organismos; mientras que en los más básicos, la fracción de

carbonato empieza nivelar la fracción de ácido carbónico; en la gráfica 3 se observan los puntos Xopanac II (8.77, 2180 msnm) y Sta Elena (8.93, 2210 msnm), que se encuentran fuera de los límites de aguas naturales que establecen las NOM-001-ECOL-1996, aunque según Lind (1985) son valores normales para este tipo de agua, viéndose incrementados sus pH's por el aporte de desechos alcalinos, principalmente del telar que se encuentra antes de estos puntos.

### SULFUROS, SULFATOS Y OXIGENO DISUELTO



Gráfica 4. Relación entre sulfuros (mg/l), sulfatos (mg/l) y oxígeno disuelto (mg/l) a lo largo del gradiente altitudinal de la subcuenca Atoyac.

La presencia de azufre se encuentra predominantemente en forma de sulfuros (gráfica 4), con un valor máximo de 15.31 mg/l y en el punto de mayor altitud (Tlatzala) se encuentra ausente, en tanto que la forma asimilable del azufre (ion sulfato) es muy variable con valores de 0.07 a 23.25 mg/l, registrándose las más altas concentraciones en las altitudes de 2180 msnm (Xopanac II y Los Cipreses), 2190 msnm (Actiopa I) y 2250 msnm (Xopanac I y Actiopa II), con valores que corresponden a la mayoría de las aguas naturales (de 5 a 50 mg/l; Lind 1985); para los restantes puntos las concentraciones se encuentran por debajo del rango mencionado.

La oxidación de los sulfuros hacia sulfatos es muy rápida y eficaz en sistemas oxigenados como éstos (a diferencia del análisis de correlación, se hace notar que si existe una estrecha relación entre estos y los sulfuros), a pesar de sus condiciones, las cantidades de sulfuros son significantes en donde el agua vertida y arrastrada lleva sales de azufre, que contribuyen al aumento de la conductividad, alcalinidad y dureza, más la cantidad de materia orgánica sedimentada que es descompuesta por las bacterias, constituye una pequeña fuente en las concentraciones de  $S^{2-}$ . La acción de los vientos que se dirigen a ésta subcuenca, arrastran material seco procedentes de las emanaciones del volcán Popocatepetl depositándolos en el suelo de la zona, y al sufrir meteorización superficial (junto con la rocas ígneas existentes que contienen sulfuros) es transportado por las aguas superficiales, como menciona Wetzel (2001); por otro lado gases de azufre (ácido

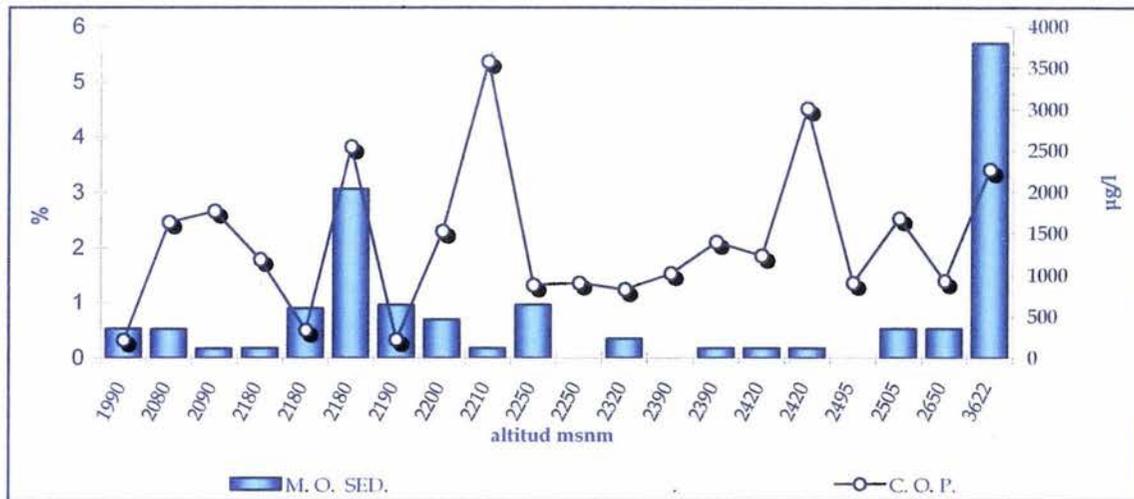
sulfídrico) provenientes del volcán se disuelven en el agua y sufren una oxidación (al igual que los  $S^{2-}$ ) generando un aumento en la cantidad de iones sulfato dentro de los sistemas.

En esta subcuenca se presentan concentraciones de oxígeno disuelto en agua en un intervalo de 1 a 10.3 mg/l (ausencia de registro en Ameyalco, 2420 msnm), la mayoría de los puntos presenta niveles cercanos a la saturación (gráfica 4), en Temizac (2420 msnm, 9.5 mg/l), Cotzala I (2495 msnm, 10.3 mg/l) y canal Cotzala (2505 msnm, 10.3 mg/l) con sobresaturación, debido en gran parte al grado de agitación del agua, y la velocidad de la misma, los accidentes del terreno y a la acción de los vientos que constituyen, según Andrade (1997), factores importantes en la reoxigenación. En Cuaxumulco (2180 msnm, 4.9 mg/l) y Sta. Elena (2210 msnm, 5 mg/l) la cantidad de oxígeno disuelto se ve disminuida siendo la principal causa la baja solubilidad del gas por el incremento de sales disueltas, mientras que en Los Cipreses (2180 msnm, 1 mg/l) su bajo nivel se atribuye, además de lo anterior, a la elevada temperatura que propicia el aumento de las reacciones metabólicas por parte de los microorganismos degradadores a partir de la materia orgánica que se encuentra en el sedimento, provocando la disminución de oxígeno por la aceleración en el proceso de degradación de esta, produciendo sustancias finales inofensivas tales como el bióxido de carbono y agua, o los compuestos inorgánicos oxidados correspondientes, con lo que se comienza a presentar condiciones de alteración en donde, de acuerdo a Sawyer *et al.* (2001) y Wetzel (2001), la solubilidad del oxígeno es el factor más limitante en la capacidad de purificación de las aguas naturales y en los tratamientos de las aguas residuales para degradar la materia orgánica que es descargada.

## MATERIA ORGÁNICA DEL SEDIMENTO Y CARBONO ORGÁNICO PARTICULADO

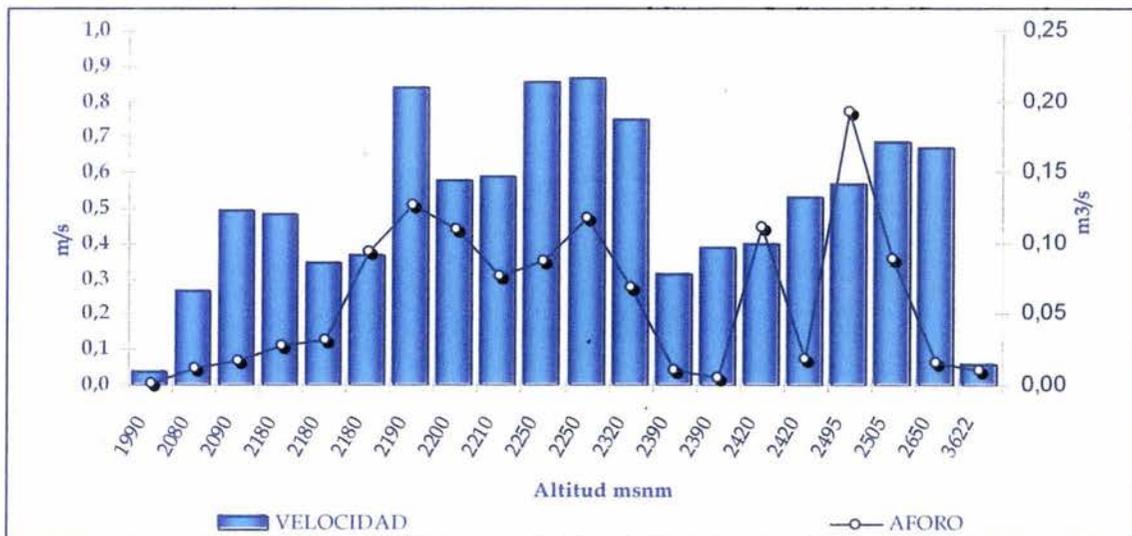
El metabolismo de la materia orgánica detrítica establece un complejo ciclo de carbono que domina tanto la estructura como la función de los sistemas en estudio, la utilización y las transformaciones de esta materia orgánica ofrecen la posibilidad de entrever la estructura cualitativa, cuantitativa y el funcionamiento de dicho ciclo (Wetzel, 2001). En función de lo anterior se midió el porcentaje de materia orgánica sedimentada y la cantidad de carbono orgánico particulado como estimación de la abundancia de la materia orgánica en el agua. La entrada de estos compuestos a los sistemas es baja y fluctuante desde la ausencia en Xopanac I (2250 msnm), Cotzala I (2495 msnm) y aporte Xochiac (2390 msnm), hasta valores de 3.06 % (Los Cipreses, 2180 msnm) y 5.7 % (Tlatzala, 3622 msnm), presentando la mayoría de los puntos un contenido extremadamente pobre en materia orgánica (MO) y de carbono orgánico particulado (COP) las concentraciones no rebasan los 3572  $\mu\text{g/l}$ , siendo la mínima de 218  $\mu\text{g/l}$  (gráfica 5), provenientes principalmente del entorno natural; estos sistemas al tener buenas condiciones de oxigenación, permiten una degradación relativamente completa de la materia orgánica (incluyendo el COP) en vías de sedimentación y la acumulación de nuevo sedimento orgánico es muy lenta o no se permite por la resuspensión de los sedimentos a causa del movimiento natural de las corrientes, permitiendo el acarreo o transporte de dichos materiales, a excepción de Tlatzala, en donde la velocidad de su corriente es tan pequeña que permite que la materia orgánica, se deposite en el fondo del cauce y se vaya degradando y fragmentando con un tiempo de retención en tramos determinados del

sistema fluvial.



Gráfica 5. Relación entre materia orgánica del sedimento (%) y carbono orgánico (µg/l) con respecto a la altitud de la subcuenca Atoyac.

## VELOCIDAD Y AFORO DE CORRIENTE



Gráfica 6. Relación entre velocidad (m/s) y aforo de corriente (m³/s) respecto a la altitud en la subcuenca Atoyac.

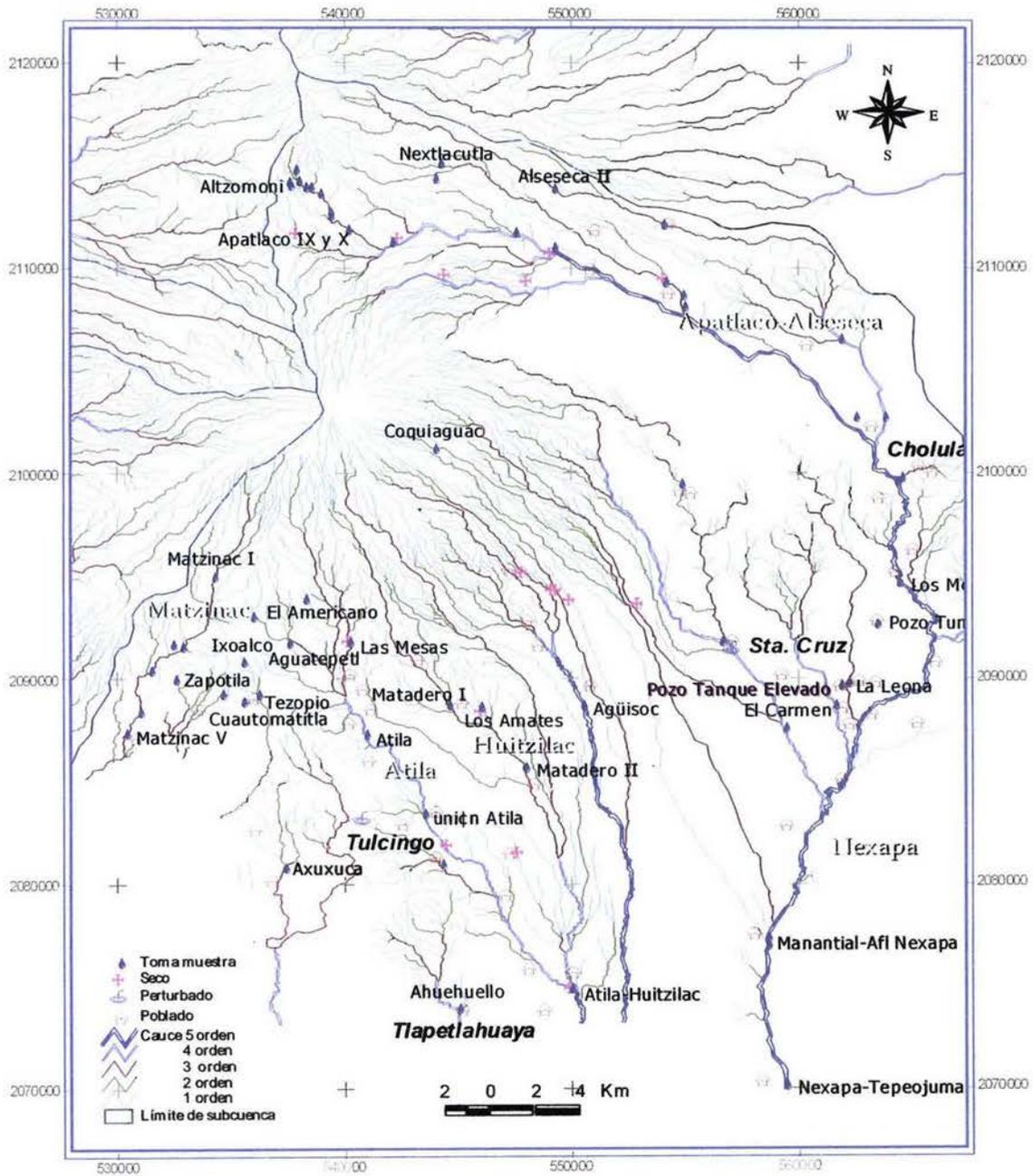
Las fluctuaciones de velocidad y aforo dan el resultado de las características geológicas del lugar, en donde la mitad de los datos registran (0.530 a 0.868 m/s), el 40% presenta velocidad media (0.264 a 0.494 m/s) y el resto muy lenta (0.035 y 0.056 m/s), además la red de drenaje presenta caudales con bajo contenido de agua que varía de 0.001 a 0.192 m³/s, aumentando conforme a la velocidad. A altitudes mayores a 2390 msnm se presentan aforos muy bajos en aporte-Xochiac, Xochiac (ambos a 2390 msnm), Iztapalapa (2420 msnm) y Cotzala II (2650 msnm) los cuales se ubican cerca de poblados, y las actividades que se generan en estos provocan una disminución en el aforo de las corrientes; conforme se desciende en altitud la unión de otros escurrimientos provoca un aumento tanto de velocidad y aforo hacia las partes medias, y la presencia de poblados en

las altitudes menores provocan una disminución en éstos, a causa de la desviación de los cauces para los cultivos. Tlatzala (3622 msnm) es el único punto de primer orden que presenta velocidad de 0.056 m/s y un aforo de 0.011 m<sup>3</sup>/s, característico del nacimiento de dicho cauce, donde la presencia de rocas grandes impide una rápida circulación del agua.

Esta subcuenca es una de las menos perturbadas en cuanto a puntos secos se refiere, presentando sólo 3 de primer orden registrados durante el otoño, y por la falta de lluvia en esta época y la intermitencia de los escurrimientos no implica una alteración humana en estos sistemas.

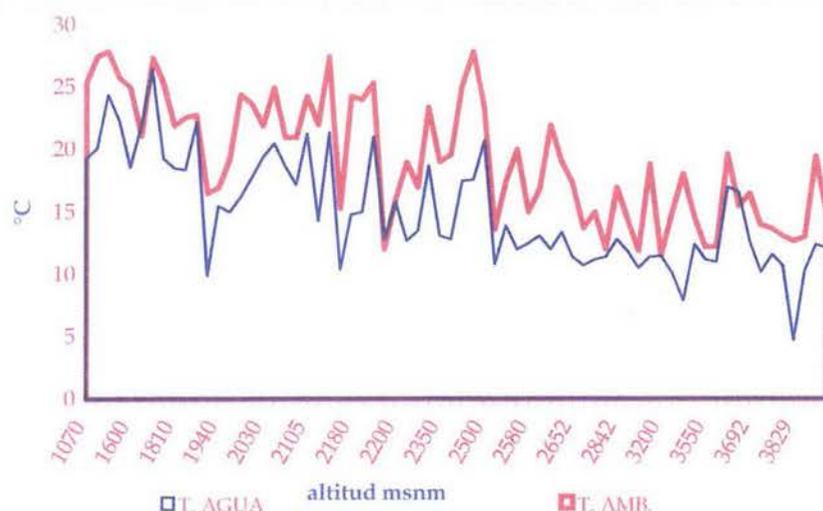
## SUBCUENCA NEXAPA

El Río Nexapa se origina con la unión de los Ríos Apol y Alseseca que llevan escurrimientos y deshielos del Iztaccíhuatl (mapa 4). Se dirige hacia el sur para unirse al Río Mezcala en el punto en que cruza el límite de los estados de Puebla y Guerrero (Chávez y Trigo, 1996).



Mapa 4. Ubicación de los puntos de monitoreo en la subcuenca Nexapa.

## TEMPERATURA



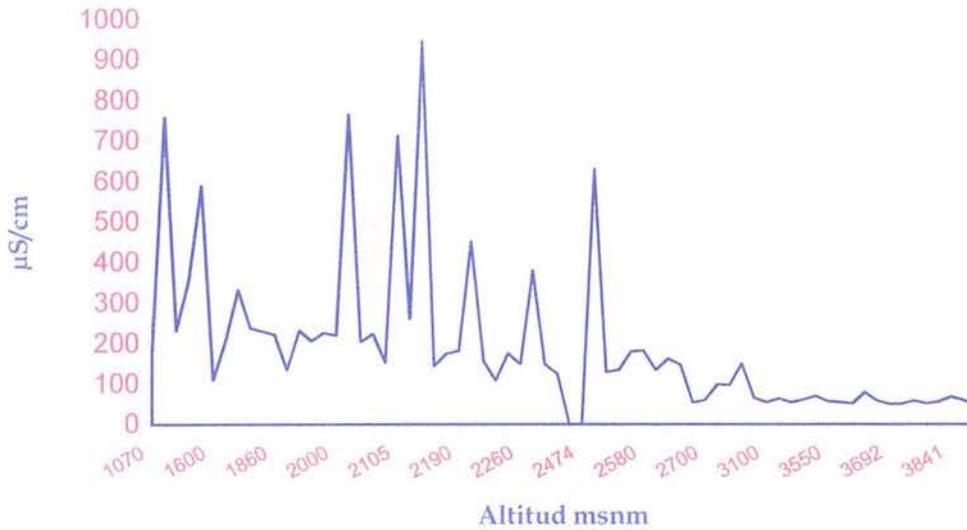
Gráfica 7. Comparación térmica de la subcuenca Nexapa.

En la gráfica correspondiente a este parámetro se observan las variaciones de la temperatura del agua de 4.7 a 26.5 °C y la temperatura del ambiente de 11.5 a 27.9 °C. De acuerdo con Tebbutt (1995) la temperatura está regida por los factores de estacionalidad variando conforme el clima, y tomando en cuenta la hora del día en que tomó la muestra, se presentan picos máximos como es el caso del punto unión Atila (1610 msnm), con temperatura del agua de 26.5 °C, debido a la absorción directa de los rayos solares, ya que a la hora en que se realizó el muestreo presentaban su mayor incidencia; en cuanto a las temperaturas mínimas, principalmente en los puntos Altzomoni (3829 msnm, 4.7 °C temperatura del agua) y Apatlaco IX (3550 msnm, temperatura del agua 7.89 °C), estos se deben principalmente al deshielo proveniente del volcán y la presencia de nevadas, en Alseseca II (1920 m, 9.9°C) es ocasionada por la abundante cobertura arbórea que impide el paso de los rayos solares.

## CONDUCTIVIDAD

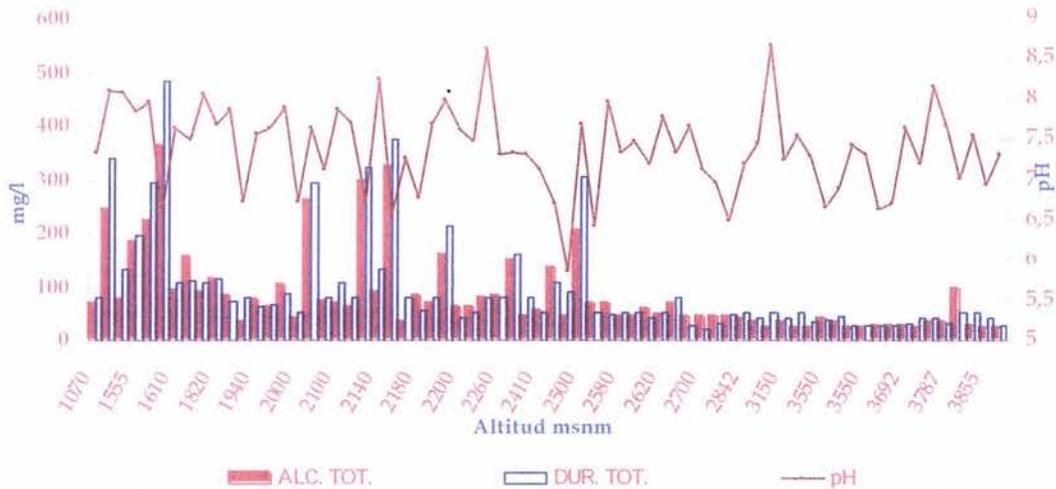
En esta subcuenca a diferencia de Atoyac, se presenta un comportamiento inverso a la altitud con valores que fluctúan de 46 a 946  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (gráfica 8), esto es debido en gran medida a que en las zonas altas de la subcuenca se presentan ordenes de corriente que no rebasan el tercer grado, y sus bajos caudales ocasionan un lento ritmo de meteorización del sedimento, de las rocas y del aporte de iones al agua de las escorrentías, cuya solubilidad y concentración va aumentando conforme se incrementa el aforo y los aportes de otras escorrentías, que de acuerdo con Margalef (1983) conducen a un aumento y a una mayor irregularidad de las sustancias disueltas en el agua, incrementándose aun más con el aporte de sales provenientes de la actividad humana, donde se destaca Tanque elevado (2160 msnm) que presenta la conductividad más alta (946  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), como consecuencia del lavado de hortalizas que se realiza en él, dando como resultado una acumulación de iones aunado al escaso movimiento del agua y al aporte del cauce la Leona. El comportamiento general de la conductividad eléctrica depende en gran parte de la cantidad de sólidos

disueltos, la alcalinidad y dureza, manteniendo una relación directa permitiendo estimar el grado de mineralización que tiene el cauce.



Gráfica 8. Comportamiento de la conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) dentro de la subcuenca Nexapa.

### ALCALINIDAD, DUREZA TOTAL, DUREZA DE CALCIO Y pH



Gráfica 9. Relación de alcalinidad total ( $\text{mg}/\text{l CaCO}_3$ ), dureza total ( $\text{mg}/\text{l CaCO}_3$ ) y pH en la subcuenca Nexapa.

Según el cuadro de alcalinidad (ver Anexo, cuadro 1) de Nisbet y Verneaux (1970) citados en Arrignon (1984), se tienen diferentes grados en esta subcuenca, cuyas concentraciones corresponden de alcalinidades bajas (de  $23 \text{ mg}/\text{l CaCO}_3$ ) a muy intensas ( $365.7 \text{ mg}/\text{l CaCO}_3$ ).

En la gráfica 9 se observa que a altitudes superiores a  $2504 \text{ msnm}$  se tienen alcalinidades bajas, efecto sólo de la erosión y dinámica de los sistemas acuáticos, provocando que la capacidad amortiguadora vaya aumentando conforme se desciende en altitud, y el aumento de los aportes ocasionan una variación en la cantidad de sales

disueltas hacia las zonas de menor altitud a la anterior, en donde se presentan marcadas variaciones como resultado de las actividades antropogénicas que aportan cierta cantidad de sales, principalmente en pozo Tumbacarretas (2105 msnm, 299 mg/l  $\text{CaCO}_3$ ), Tanque elevado (325.45 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , 2160 msnm, construido a partir de una pequeña desviación del río La leona), cuyas concentraciones están ligadas a la conductividad a causa del uso del agua como ya se discutió anteriormente, Axuxuca (264.5 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , 2030 msnm) es afectado por los desechos domésticos; bajo las mismas condiciones se encuentran Cuescomate (207 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , 2500 msnm), manantial afluyente-Nexapa (1600 msnm, 365.7 mg/l  $\text{CaCO}_3$ ), Nexapa-Atoyac (1600 msnm, 224.25 mg/l  $\text{CaCO}_3$ ) y Nexapa-Tepeojuma (247.25 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , 1500 msnm) en donde además, cabe resaltar que estos puntos se encuentran de manera consecutiva en la parte final del sistema Apatlaco-Alseseca-Nexapa dando como resultado concentraciones altas por el acarreo y acumulación de aguas arriba.

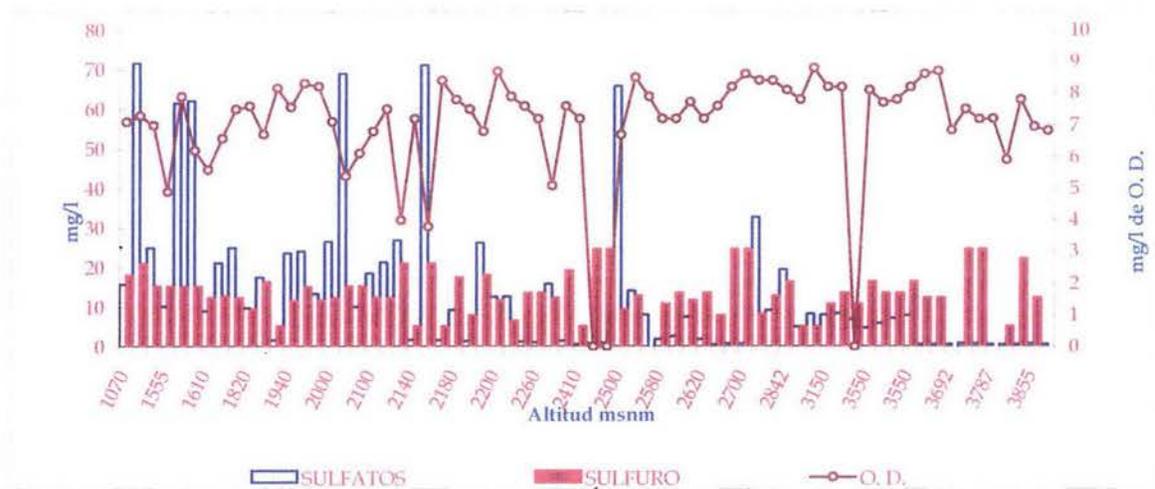
Mientras que los grados de dureza oscilan de 21.52 a 484.23 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , y según Gray (1994) y Romero (1999), cuadro 2 del Anexo, van de blandas a muy duras; presentando la mayoría aguas blandas y moderadamente duras en donde la alcalinidad resultó menor que la dureza, lo que indica que además de los bicarbonatos existen otras sales como sulfatos, cloruros, nitratos de calcio y de magnesio que le confieren dureza al agua; cabe señalar que en donde se tienen las alcalinidades más altas, la dureza presenta el mismo comportamiento aunque es superior a la alcalinidad. En cuanto a la dureza de calcio se presentan cantidades de 10.76 a 233.15 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , en 19 puntos esta dureza es causada enteramente por el calcio, de los cuales 12 se encuentran dentro del sistema Apatlaco-Alseseca-Nexapa (mapa 4).

De manera general, el comportamiento de ambos parámetros (alcalinidad y dureza) es ascendente, con respecto a la altitud, con poca cantidad de sales provenientes del desgaste de las rocas y del sedimento, por lo que este tipo de aguas podrían tener diferentes usos como agrícolas y urbanas, aunque en las zonas bajas se necesita un ligero tratamiento en algunos puntos para disminuir la dureza y alcalinidad provocada por actividades urbanas.

Los datos de esta subcuenca, de 5.87 a 8.67, quedan comprendidos dentro del intervalo de pH para aguas epicontinentales, tiene un papel preponderante el ión bicarbonato, con excepción de Nextlacutla (3100 msnm, dentro del cauce Apatlaco-Alseseca-Nexapa, gráfica 9) y el punto Matzinac IV (2200 msnm, en el cauce del mismo nombre, tabla 3) que rebasan el límite máximo permisible de las Normas Oficiales Mexicanas (6.5 a 8.5), causado por la presencia de trazas del ion carbonato, mientras que el punto Las Mesas (2474 msnm, un canal de concreto de 54 cm de ancho) se encuentra por debajo del límite inferior de dichas normas, y cuyo valor de pH es atribuido a la gran cantidad de sulfuros, los cuales se oxidan produciendo un exceso de iones sulfato en solución (Margalef, 1995) lo que provoca una cierta acidez en el agua.

## SULFUROS, SULFATOS Y OXIGENO DISUELTO

Los valores de sulfuros se presentan desde cantidades nulas hasta 24.73 mg/l, como lo muestra la gráfica 10, en la cual se destacan los puntos más altos, que se ubican de manera consecutiva en la parte inicial del sistema Apatlaco-Alseseca-Nexapa (el más importante de esta subcuenca), en donde el punto Unión (3841 msnm) presenta una concentración de 22.28 mg/l que aumenta en Apatlaco IV (3726 msnm) con 24.73 mg/l, manteniéndose constante en los puntos posteriores, que son Apatlaco V (3725 msnm), Cuatrotolontia (2700 msnm) y Tepetzingo (2652 msnm) los cuales son originados por la disolución de las rocas, el acarreo y acumulación por medio de transporte atmosférico de materiales, entre ellos los compuestos de azufre emanados por el volcán, y por la materia orgánica del sedimento; a pesar de que en la mayoría se presentan valores elevados, estos iones no representan peligro para la vida acuática mientras exista oxígeno en cantidades adecuadas.



Gráfica 10. Relación entre sulfuros (mg/l), sulfatos (mg/l) y oxígeno disuelto (mg/l) en el subcuenca de Nexapa.

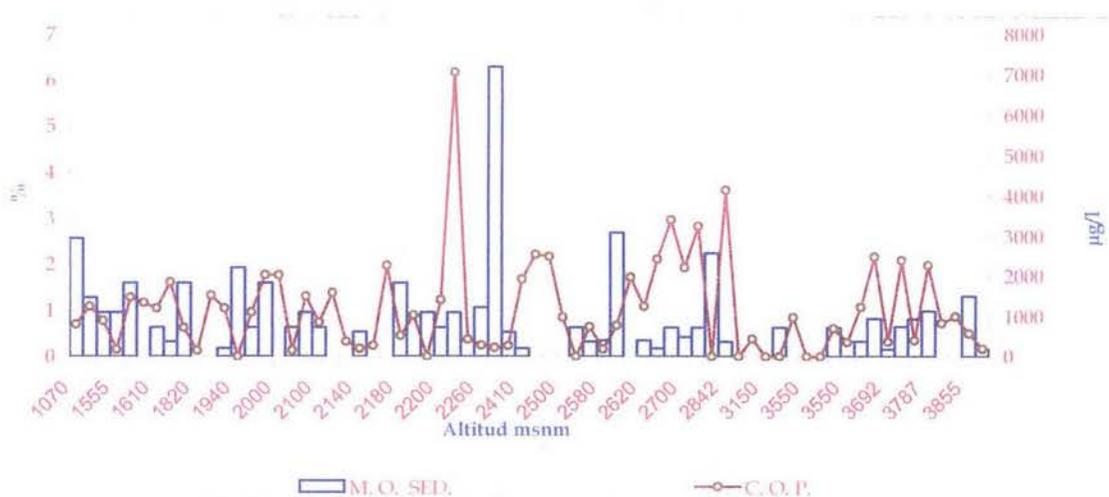
Además de los puntos anteriores también destacan Las Mesas (2474 msnm, 24.73 mg/l) cuya cantidad es aportada por el arrastre de aguas arriba provenientes del deshielo; Molino (2448 msnm, 24.73 mg/l) su acumulación se debe a que en las partes anteriores al punto de muestreo existen aportaciones de otros escurrimientos, y Nexapa-Tepeojuma (1500 msnm, 21.95 mg/l), en donde además del arrastre de todo el sistema antes mencionado, también influyen las aportaciones de sales del poblado que se encuentra en la cercanía. La ausencia en algunos de los puntos se debe, principalmente, a una alta oxigenación y conversión total a sulfatos.

Las sales de sulfato obtenidas en esta área varían de 0.49 a 71.63 mg/l, donde se presentan grandes fluctuaciones a lo largo del gradiente altitudinal, principalmente en las partes bajas, ahí se tienen casos extraordinarios como Cuescomate (2500 msnm, 65.80 mg/l), Manantial afluyente-Nexapa (1600 msnm, 62.10 mg/l), Nexapa-Atoyac (1600 msnm, 62.10 mg/l) y Nexapa-Tepeojuma (1500 msnm, 71.63 mg/l), cuyos valores indican que se trata de aguas moderada y altamente sulfatadas que origina una alta cantidad de sales, ya que los límites normales de sulfatos para los cuerpos de agua se encuentran entre 5 y 30

mg/l con promedio de 11 mg/l (Ramos, 2001; Wetzel, 2001), generadas por la cercanía de poblados que vierten sus desechos al cauce, principalmente sales sulfatadas, llevándose a cabo el ciclo del azufre de manera eficaz a partir de la descomposición de la materia orgánica que existe en el lugar produciendo en el proceso  $\text{SH}_2$ , una forma reducida de azufre.

Por otro lado, Axuxuca (2030 msnm, 68.98 mg/l) tiene una mayor presencia por la cercanía del poblado San Mateo que le aporta sales sulfatadas, principalmente de calcio, que intensifican la alcalinidad y provocan dureza en el agua, mientras que el punto Tanque elevado (2160 msnm) presenta las cantidades más altas (71.10 mg/l) por la acumulación de sales tanto del desvío hacia este punto como del uso que se le da al agua, en donde quizá se utilizan fertilizantes para cultivar las hortalizas que lavan en este lugar. Para el caso del oxígeno disuelto se tiene un intervalo de 3.8 a 8.8 mg/l, cuyas concentraciones en la mayoría de los casos son altas, cercanas y rebasando los niveles de saturación en corrientes, el grado de agitación del agua debido a su velocidad, accidentes del terreno y a la acción del viento, según Gordon *et al.* (1992), ayudan a que se presente una baja desoxigenación, en donde existe una reserva de oxígeno como amortiguador para mezclarse con cualquier contaminante que pueda estar presente (Hernández y Rivera 1996; Mason 1991); además estos niveles indican la presencia de organismos fotosintetizadores que, junto con lo anterior, constituye un factor importante de oxigenación del agua, de acuerdo a Tebutt (1995), las aguas superficiales limpias normalmente están saturadas con oxígeno disuelto, pero la demanda de oxígeno por los desechos orgánicos, el consumo por animales, plantas y en especial por la respiración bacteriana, además de la oxidación de las sales inorgánicas pueden consumirlo rápidamente, como es en el caso pozo Tumbacarretas (2105 msnm) y Tanque Elevado (2160 msnm), en los que los efectos de aereación son bajos debido a su almacenamiento y escaso movimiento.

## MATERIA ORGÁNICA DEL SEDIMENTO Y CARBONO ORGÁNICO PARTICULADO



Gráfica 11. Relación entre materia orgánica del sedimento (%) y carbono orgánico particulado (µg/l) en la subcuenca Nexapa.

En la gráfica 11, se observan las variaciones de materia orgánica en sedimentos con ausencia o carencia total a extremadamente ricos (6.30 %), dichas fluctuaciones se presentan a lo largo del gradiente altitudinal aunque en las partes bajas se observa un ligero incremento en los porcentajes, resaltando los puntos El Carmen (2350 msnm, 6.30%), Afluente-Matzinac (2580 msnm, 2.70%), Los Molinos (1070 msnm, 2.28%) y El Americano (2837 msnm, 2.26%) por el hecho de que las fuentes alóctonas de materia orgánica de los sistemas acuáticos son de origen terrestre principalmente vegetal, que puede incorporarse a las aguas del cauce tanto directamente a partir del herbaje de las orillas, como transportada por el agua de escorrentía, o como resultado de la acción de transporte de materiales por el viento, además en Los Molinos y El Carmen, sufren una alteración por el aporte de descargas residuales de poblaciones aledañas.

En general el aporte principal de la materia orgánica es la vegetación circundante, dando como resultado sedimentos con bajo contenido de ésta a causa de su lenta degradación, además las velocidades que llevan las corrientes influyen en el arrastre de estos compuestos y no permiten su sedimentación, por lo cual no existe una gran acumulación de este material en el sedimento.

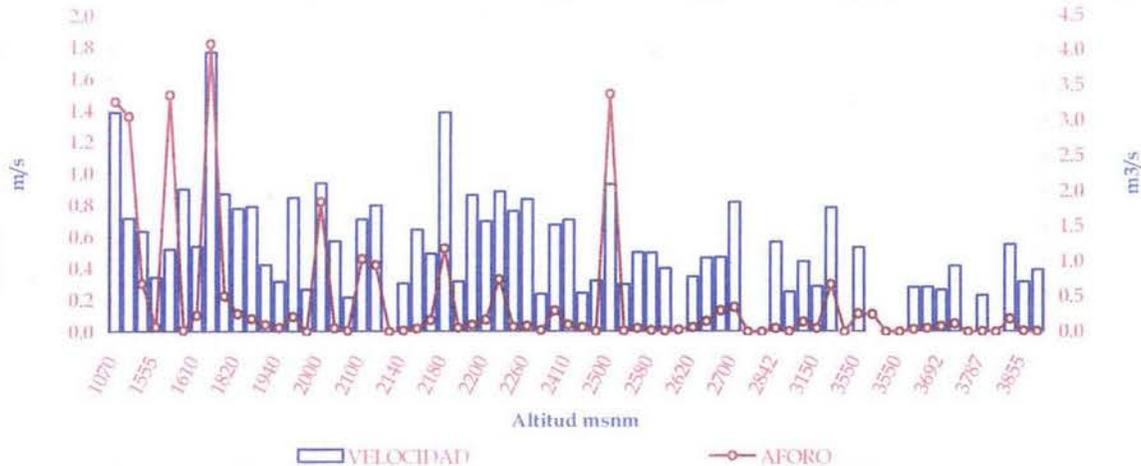
La variación que presenta el carbono orgánico particulado es muy fuerte sin que tenga un comportamiento definido, con cantidades desde la ausencia hasta 7065 µg/l, y en 5 puntos no se tiene nota de ello. Dichas fluctuaciones indican procesos de migración y transformación de la materia orgánica así como una importante muestra de los factores geoquímicos que imperan en el suelo de las zonas aledañas a los cauces, dichos valores corresponden en la mayoría de los casos al intervalo de concentración en aguas naturales, que según Artemyev (1996), oscila de 1 a 10 mg/l (1000 a 10 000 µg/l) en ríos.

Existen puntos en los que la concentración es inferior al intervalo mencionado, aunque estos se consideran que son cantidades normales para este tipo de sistema puesto que los materiales generados son de muy lenta degradación, esto se debe a la presencia de suelos pobremente desarrollados de carácter volcánico en dónde la materia orgánica se encuentra en proceso de transformación inicial a partir de residuos vegetales, principalmente, mientras que en algunos sitios la velocidad de la corriente es el principal factor que influye en la disminución de la concentración de este parámetro evitando que se acumule, tomando como referencia al punto Tanque elevado (2160 msnm) donde la concentración es baja por la tasa de recambio de agua que existe en el lugar debido a la desviación del cauce La Leona para captarla y después de su uso es vertida nuevamente al cauce de origen, en tanto que en el pozo Tumbacarretas (2105 msnm) su concentración es baja debido a la degradación avanzada de la materia orgánica particulada, en forma de carbono, a su vez se ve reflejado en el aumento de la cantidad de sulfatos y disminución de oxígeno disuelto.

## VELOCIDAD Y AFORO DE CORRIENTE

En esta subcuenca se presenta una red de drenaje con diversas velocidades de corriente desde 0.216 hasta 1.768 m/s, según la gráfica 12; estas corrientes se pueden clasificar como aguas con velocidades lentas a muy rápidas (según el cuadro 4, ver Anexo),

y corresponden a cauces ocasionales y temporales (cuadro 5 del Anexo) con valores de 0.002 a 4.103 m<sup>3</sup>/s. Los puntos que se presentan en las partes altas de la subcuenca, por ser escurrimientos que provienen de deshielo y pertenecer a ordenes pequeños llevan caudales con bajos volúmenes y velocidades que en su mayoría son lentas, aunque en algunos puntos la pendiente y presencia de lecho rocoso hace que aumente la velocidad.



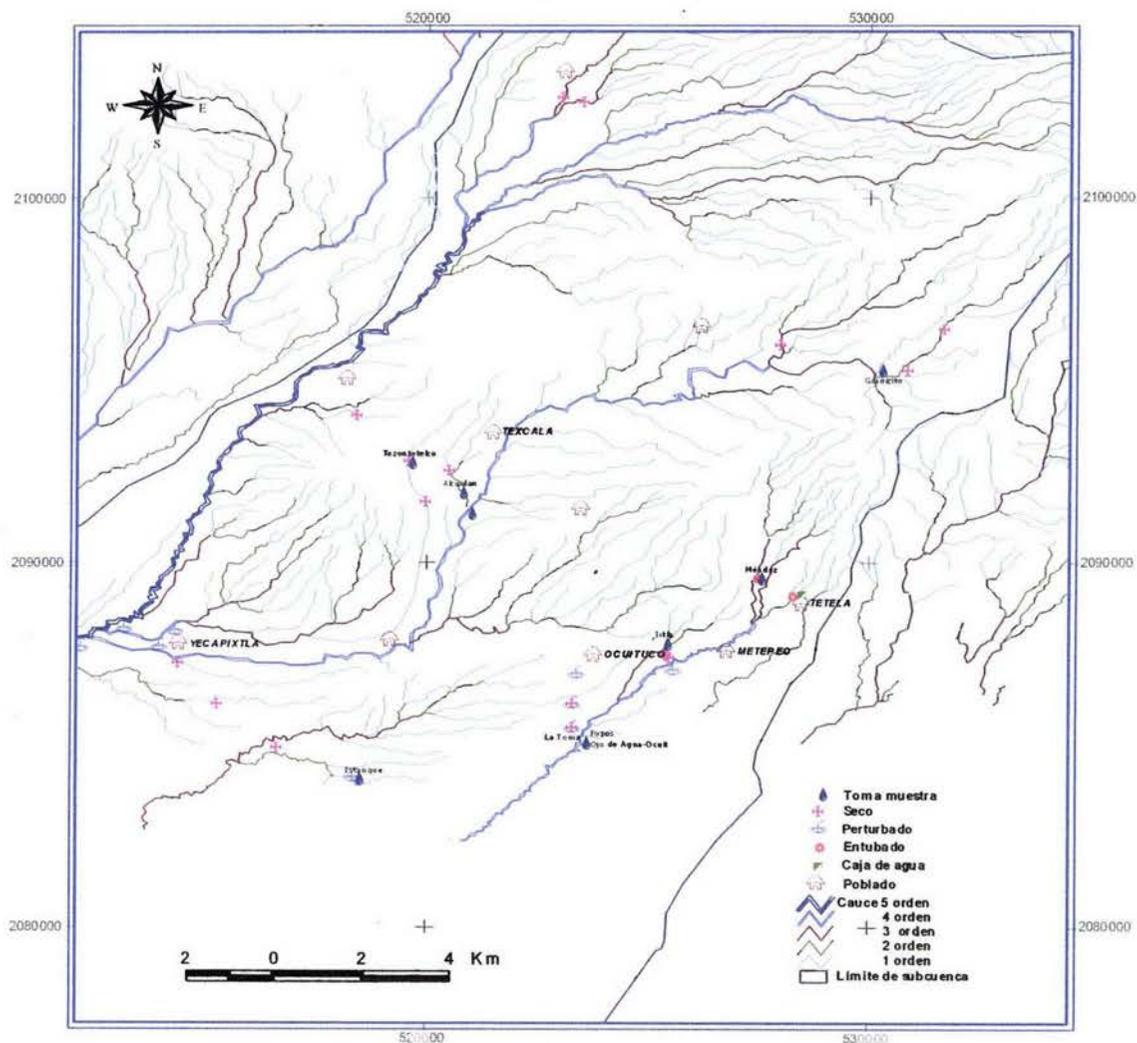
Gráfica 12. Relación entre velocidad (m/s) y aforo de corriente (m<sup>3</sup>/s) a lo largo de la subcuenca Nexapa.

Por el contrario en las partes bajas el aporte de diversos caudales de cuarto orden y menores incrementan el volumen de agua que llevan los cauces y también la velocidad.

Esta subcuenca por ser la más grande del área de estudio presenta la mayor cantidad de puntos de toma de muestra (68) e igualmente la mayor cantidad de puntos secos (17 registrados), además de dos perturbados. Estos últimos, de primero y cuarto orden, se encuentran ubicados cerca de los poblados de Tulcingo y Santa Cruz respectivamente, en donde la principal alteración que provocan los pobladores son las descargas de drenaje y la utilización de estos sistemas como basureros a cielo abierto. De los puntos secos se tienen registrados: 6 de primer orden, 3 de segundo, 6 de tercero y 2 de cuarto; tres de los de primer orden se encuentran en las partes altas del sistema Apatlaco-Alseseca-Nexapa (hacia el norte), donde no existen asentamientos humanos, y la condición en la que se encuentran son a causa de alteraciones naturales de los sistemas debido a falta de lluvia, o bien a infiltración o evaporación de los escurrimientos provenientes del deshielo; por otro lado, los restantes puntos de este orden se ubican en el cauce Atila-Hutzilac (ver mapa 3), y muy cerca de poblados, en donde la alteración que han provocado en su entorno no permite una buena captación de agua de lluvia, ya que no podían ser escurrimientos provenientes del deshielo puesto que se ubican en las partes más bajas del área de estudio. En cuanto a los de segundo y tercer orden que se encuentran en la parte norte de la subcuenca pueden deber su alteración a que no reciben aportes de los cauces de orden menor que son sistemas ocasionales; y los que se ubican hacia la parte sur, incluyendo también los de cuarto orden, se debe principalmente al desvío de los cauces hacia las poblaciones y zonas agrícolas, finalmente en esta área no se registraron cauces entubados ni cajas de agua.

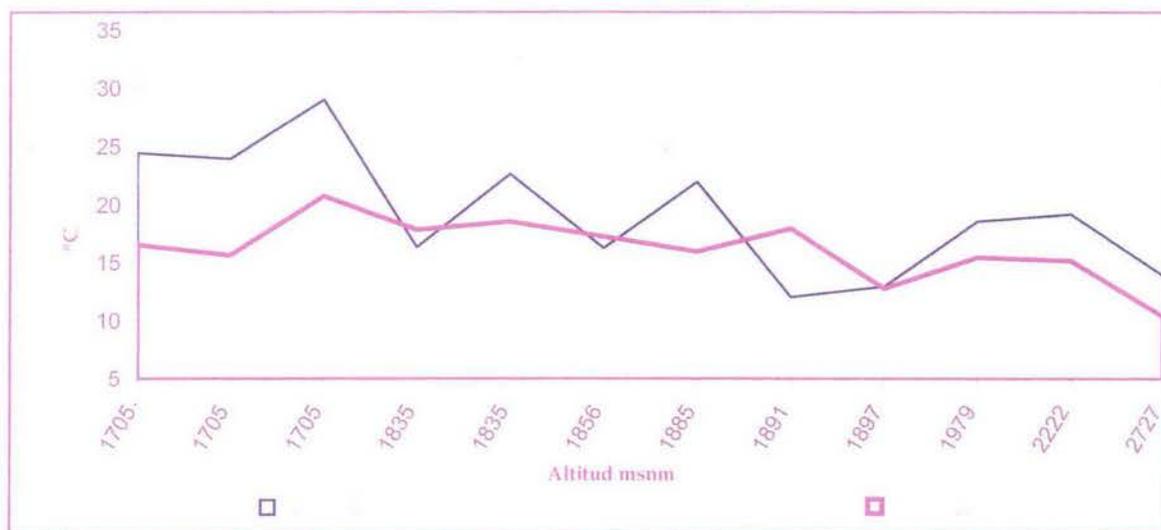
## SUBCUENCA CUAUTLA

La corriente más importante de esta subcuenca es uno de los principales formadores del río Balsas. Se origina en los deshielos que descienden desde altitudes del orden de 4000 msnm del flanco oriental del volcán Iztaccíhuatl en los límites entre el Estado de México y Puebla. La aportación al estado de Morelos es mínima, ya que dentro de la entidad sólo son escurrimientos que drenan hacia la corriente principal (río Atoyac), teniendo su aprovechamiento máximo en el estado de Puebla (INEGI, 1981). Cabe resaltar que el bajo número de puntos de monitoreo (mapa 5) fue a causa de la inaccesibilidad de la zona, por cuestiones sociales y geográficas.



Mapa 5. Ubicación de los puntos de monitoreo en la subcuenca Cuautla.

## TEMPERATURA



Gráfica 13. Comparación térmica con respecto a la altitud de la subcuenca Cuautla.

En general, la gráfica 13, indica que las temperaturas tienen un comportamiento con base a la altitud ya que ambas disminuyen conforme el gradiente altitudinal aumenta y viceversa con un intervalo de 12.1 a 29.1 °C temperatura ambiente y de 10.4 a 20.8 °C temperatura del agua, siendo esta última menor que la ambiente a excepción de La Toma (1835 msnm), Ojo de agua-Ocuituco (1856 msnm) y Alcuálán (1891 msnm), con una diferencia de aproximadamente 1 °C, este comportamiento se puede explicar por el hecho de que los dos primeros muestreos se realizaron entre 12:00 y 13:00 hrs cuando los rayos solares son más intensos, además del aporte de calor de las rocas hacia el agua, mientras que el último punto se realizó a las 19:00 hrs, cuando la temperatura ambiente disminuye por falta de radiación solar en las tardes y noches, y el calor que se acumuló durante el día en el agua se va perdiendo muy lentamente, lo que significa que los aportes y pérdidas de éste son superficiales.

## CONDUCTIVIDAD

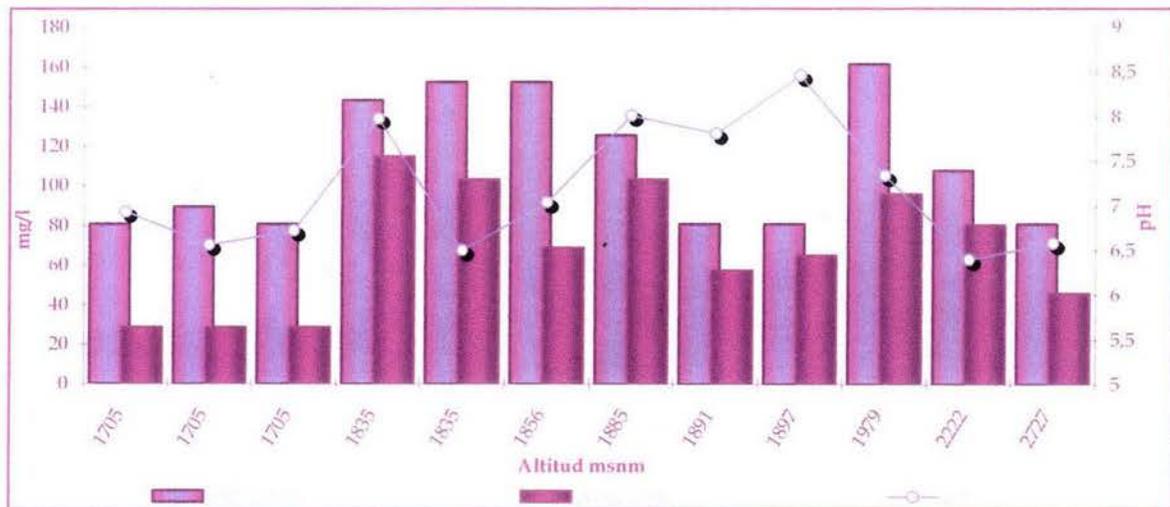
Para este parámetro se presenta una gran variación que va de 0.1 a 306  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , donde la mayoría de los puntos sobrepasan los 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y hacia las altitudes medias se tienen los valores más altos registrados (gráfica 14) para esta subcuenca que son Ixtla (1885 msnm, 306  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), Pozo (1835 msnm, 291  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y Barranca Méndez (2222 msnm, 211  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lo que indica presencia de sales provenientes de aportes de los poblados cercanos, reflejándose en las concentraciones de alcalinidad y dureza, en el estanque se tienen valores de 102, 102.3 y 104.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (estación I, II y III), debido al poco movimiento del agua, a un área mayor que permite el incremento de la evaporación durante la época de estiaje en que se tomaron las muestras y a los escasos afluentes. Sin embargo en otras zonas (en 5 puntos) se tienen valores por debajo de los 3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , cuya baja capacidad de transmitir corriente eléctrica es causada por la presencia de una gran cantidad de

moléculas de compuestos orgánicos no disociados que son escasos o nulamente conductores, en donde se presentan cantidades de carbono orgánico particulado mayores a 1 mg/l, interfiriendo en la medición de la conductividad.



Gráfica 14. Comportamiento de la conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) a lo largo del gradiente altitudinal de la subcuenca Cuautla.

### ALCALINIDAD, DUREZA TOTAL, DUREZA DE CALCIO Y pH



Gráfica 15. Relación de la alcalinidad total ( $\text{mg}/\text{l}$  de  $\text{CaCO}_3$ ), dureza total ( $\text{mg}/\text{l}$  de  $\text{CaCO}_3$ ) y pH, con respecto a la altitud de la subcuenca Cuautla.

En general, la alcalinidad del agua tiene un versátil comportamiento para esta subcuenca (gráfica 15), en donde la mayoría contienen bajas concentraciones (28.75 a 115  $\text{mg}/\text{l}$  de  $\text{CaCO}_3$ ) causada principalmente por sales de ácidos débiles, contribuyendo también las bases, débiles y fuertes. Los bicarbonatos representan la principal forma de alcalinidad los que se tornan, como menciona Barcenás (1975), por la acción del  $\text{CO}_2$  sobre materiales básicos en el suelo, algunos ácidos orgánicos resistentes a la oxidación biológica forman sales, aumentando así la alcalinidad de los sistemas, lo cual indica que los sistemas

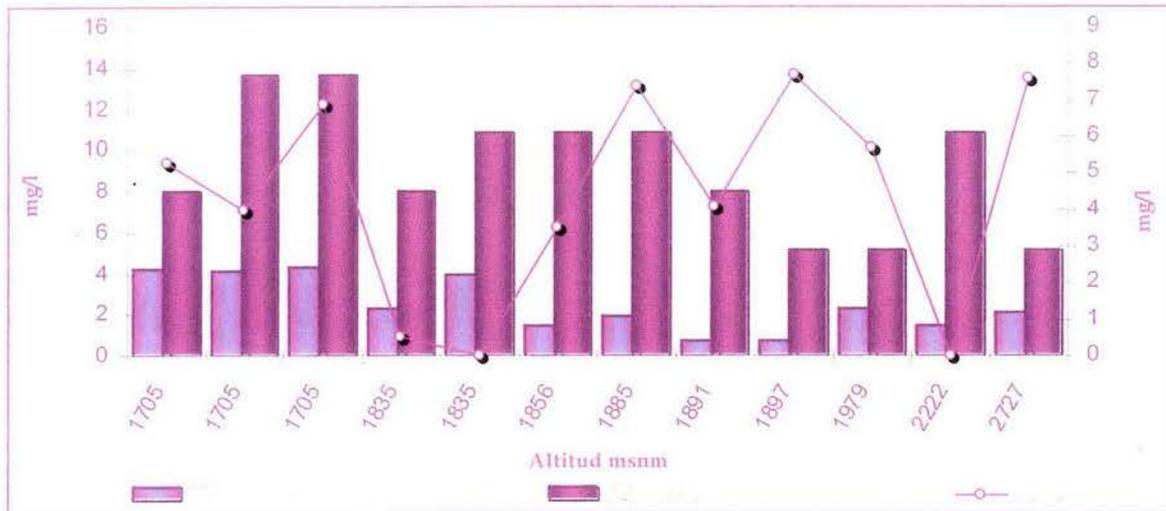
presentan un buen sistema de amortiguamiento ya que los desechos de la erosión por efecto del agua la mantienen, aunque éstos sistemas se ven afectados por la cantidad de iones calcio y magnesio que presentan en todos los casos durezas de tipo carbonatadas y no carbonatadas.

Se observa en la gráfica 15 que la dureza total presenta un comportamiento irregular con valores de aguas moderadamente duras a duras (80.71 hasta 161.41 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ), en cinco puntos esta dureza está dada por el ión calcio y en el resto además por magnesio. En la mayoría de los sistemas se presentan aguas moderadamente duras, las que se explican por el desgaste y arrastre de rocas circundantes con contenidos de carbonatos desde las partes altas; mientras que las aguas duras se encuentran en los puntos Tezontetelco (1979 msnm, 161.41 mg/l  $\text{CaCO}_3$ ), debido al calcio, que según Nemerow (1995), indican que estos iones proceden principalmente de la meteorización de rocas ígneas que contienen compuestos de Calcio (principalmente  $\text{CaO}$ , Fassbenber, 1987) Pozo y Ojo de agua-Ocuituco (ambos con 152.44 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , a una altitud de 1835 y 1856 msnm, respectivamente), presentan infiltraciones de agua que acarrea consigo iones principalmente calcio, en estos puntos (muy cerca entre sí) se trata de purificar el agua de manera natural, ya que la corriente es de tipo residual, con descargas de los poblados Tetela del Volcán, Xochicalco y Metepec además que la corriente atraviesa la zona urbana.

Con relación al pH, sus valores se registran dentro del intervalo de 6.4 a 8.46 la mayoría en los límites establecidos para aguas naturales de 6.5-8.5 (Romero, 1999), a excepción de Barranca Méndez (2222 msnm) que se encuentra por debajo de estos límites como consecuencia de la presencia de compuestos húmicos provenientes de la descomposición de la materia orgánica que es arrastrada por otros efluentes que confluyen antes de este punto, este valor, da la idea del tipo de proceso biológico mediante el cual se efectúa la degradación de materia orgánica en sedimento, que se está llevando a cabo lentamente, pues a un pH muy desfavorable, como menciona Armijo (1982), la actividad biológica, podría inhibirse, quedando así retardada la recuperación de la corriente, dicho valor indica, según Margalef (1995), que hay una considerable presencia de iones  $\text{HCO}_3^-$  y otro tanto en forma de ácido carbónico, mientras que el punto Los Arcos (1897 msnm, pH de 8.46) se tiene tanto carbonatos como bicarbonatos, en donde la escorrentía ya no se diluye, pero no rebasan los límites máximos permisibles para aguas naturales.

## SULFUROS, SULFATOS Y OXIGENO DISUELTO

De una manera inconstante los sulfuros (gráfica 16) se encuentran con valores que van desde 5.16 a 13.72 mg/l, la mitad de los puntos rebasan los 10 mg/l. Los puntos más altos son las estaciones II y III (ambos a 1705 msnm y 13.72 mg/l) de un estanque, cuyas concentraciones se deben a la acumulación de iones causado por el represamiento del agua que utilizan para riego de cultivos cercanos, además de lo ya mencionado en los parámetros anteriores; en Pozo y Ojo de agua-Ocuituco (10.87 mg/l, cada uno con altitudes de 1835 y 1856 msnm, respectivamente), la filtración que se da a través del subsuelo acarrea compuestos sulfurosos de las rocas, mientras que en los puntos restantes el movimiento de las aguas y las características de cada lugar determinan la variación de sulfuros.



Gráfica 16. Relación entre sulfuros (mg/l), sulfatos (mg/l) y oxígeno disuelto (mg/l) con respecto al gradiente altitudinal de la subcuenca Cuautla.

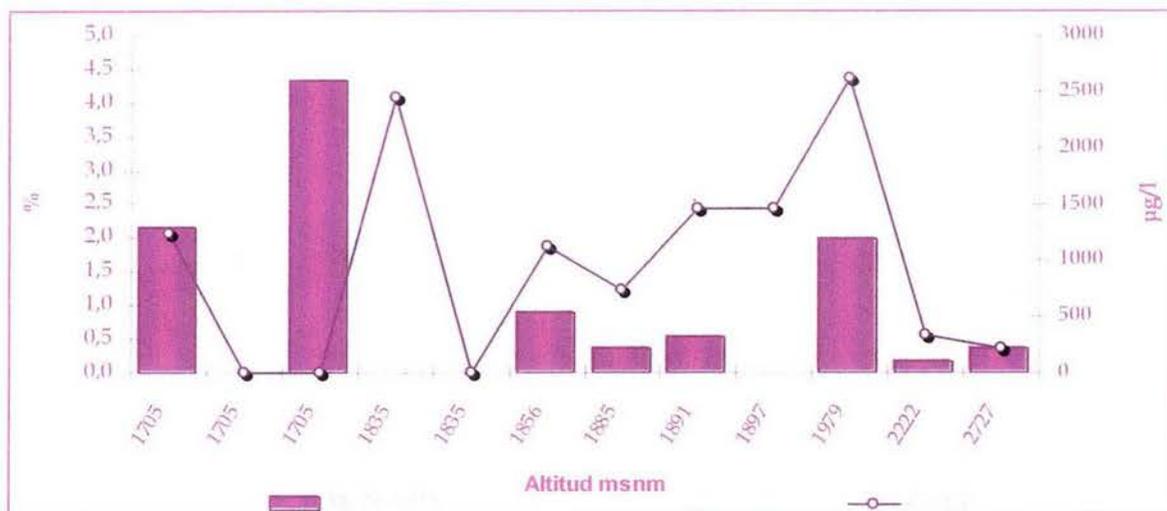
En cuanto a los sulfatos el comportamiento es poco variable, que presenta valores de 0.69 a 4.29 mg/l, con las menores cantidades en las zonas de mayor altitud; en general son concentraciones bajas, siempre menores a los sulfuros, y su presencia se atribuye a los procesos naturales de oxidación de estos últimos, lo que significa que el ciclo del azufre se está llevando a cabo muy lentamente.

Las concentraciones de oxígeno disuelto son variables de 0.5 a 7.7 mg/l, la mayoría con valores aceptables para estos tipos de sistemas, es decir se encuentran cercanos a la saturación, mientras que el 41.6% de los datos presentan concentraciones muy bajas y en dos puntos se carece de registro. Los niveles de oxígeno que se presentan se ven influidos por las características rocosas que predominan en estos sistemas, lo que provoca caídas y un movimiento fluido de agua, de esta manera el proceso de oxigenación se lleva a cabo con eficacia, aunque en La Toma (1835 msnm, 0.5 mg/l), la concentración de este gas llega casi al abatimiento debido a su procedencia residual.

## MATERIA ORGÁNICA DEL SEDIMENTO Y CARBONO ORGÁNICO PARTICULADO

De manera general la materia orgánica (gráfica 17) se encuentra desde la ausencia hasta un sedimento extremadamente rico en ella (4.32 %), encontrando en las zonas inferiores los puntos con los porcentajes más elevados, ubicados en el estanque intercomunicado (1705 msnm), a causa de la presencia de animales en el lugar como patos, garzas, pájaros, además de las actividades de ganadería y cultivo cuyos desechos orgánicos se van acumulando, cabe mencionar que el muestreo se llevó a cabo en dos orillas opuesta del cuerpo acuático; conforme aumenta la altitud los valores disminuyen, ubicándose las ausencias en Pozos, La Toma (ambos en 1835 msnm) y Los Arcos (1897 msnm), en este último caso se debe a la buena oxigenación que presenta, que provoca una degradación

total de este material, en tanto que en La Toma (1835 msnm) el agua acarrea, en su mayoría, sales residuales más que materia orgánica y este tipo de material aportado por el entorno se retiene junto con la basura por medio de una malla que se encuentra antes del punto de muestra, lo cual impide la acumulación en el sedimento de este sitio, no así la materia particulada que tiene libre paso y se incrementa debido a la falta de velocidad. En el resto de los puntos, el contenido bajo de materia orgánica indica que estos sistemas se encuentran en buenas condiciones por el aporte natural del entorno.



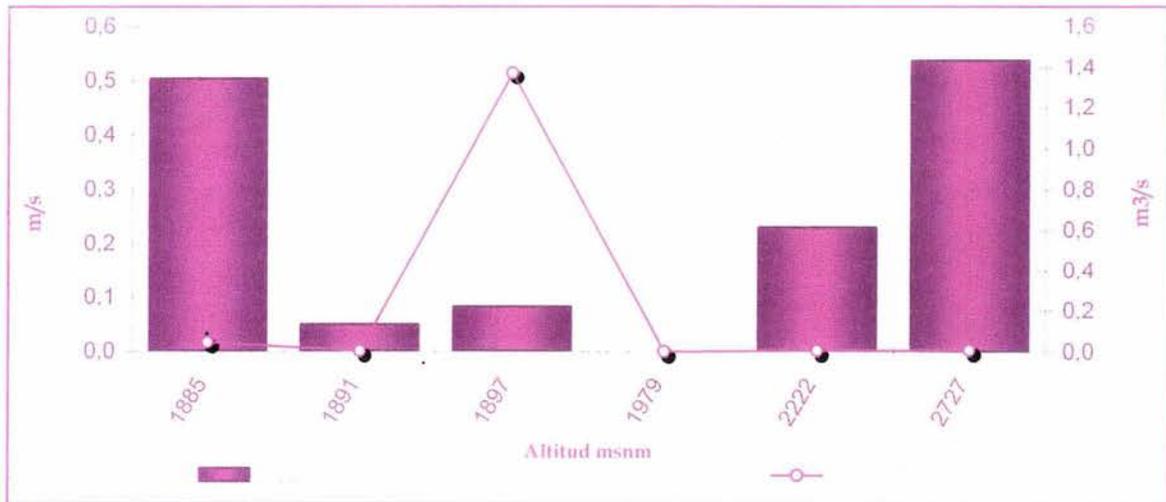
Gráfica 17. Relación entre materia orgánica del sedimento (%) y carbono orgánico particulado ( $\mu\text{g/l}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca Cuautla.

La variación del carbono orgánico particulado es marcada ya que hay puntos que presentan cantidades de 212 a 2611  $\mu\text{g/l}$ ; en las altitudes más bajas se presentan 3 puntos que no tienen registro, a partir de la altitud de 1856 msnm se observa un aumento de este parámetro hasta los 1979 msnm y en las altitudes superiores a este último se presenta una disminución. En Tezontetelco (1979 msnm) el movimiento de una pequeña caída de agua no permite la sedimentación, lo cual da como resultado el valor más alto dentro de la subcuenca, mientras que el punto Granizito (2727 msnm), presenta la cantidad más baja (212  $\mu\text{g/l}$ ) debido a que su alta velocidad no permite una acumulación arrastrando todos los compuestos orgánicos. Generalizando, los valores que presenta la subcuenca son bajos para estos tipos de sistemas, cuyos niveles se ven modificados constantemente por la dinámica de los sistemas lóticos que impiden se vayan acumulando.

## VELOCIDAD Y AFORO DE CORRIENTE

En la gráfica 18 se registran únicamente los datos de los cauces que presentan movimiento, excluyendo las tres estaciones del Estanque (1705 msnm), la Toma, Pozo (ambos a 1835 msnm), Ojo de agua (1856 msnm) y Tezontetelco (1979 msnm), en este la velocidad es casi nula, ubicándose la mayoría en las menores altitudes, a causa de que en

los primeros existe estancamiento. En los cinco puntos en que se pudo determinar estos parámetros, se ubican en las altitudes superiores a los 1885 msnm (gráfica18), con velocidades que varían desde muy lentas (0.049 m/s) a rápidas (0.538 m/s), según el cuadro 4 del Anexo, y caudales que representan cauces temporales y ocasionales con aforos de 0.002 a 1.374 m<sup>3</sup>/s, en donde se observa una relación inversa entre ambos parámetros es decir donde se tiene una velocidad mayor, el aforo es pequeño y viceversa, a excepción de Alcualán (1891 msnm) de segundo orden, que presenta una velocidad muy lenta y un aforo demasiado bajo (0.002 m<sup>3</sup>/s), a causa de falta de aporte del punto que se registro unos metros antes de dicho lugar; en los Arcos por ser un cauce de cuarto orden presenta diferentes aportes que aumentan el volumen de agua mientras que la abundante vegetación, la presencia de rocas y la escasa pendiente provocan una velocidad lenta del caudal. En Ixtla (1885 msnm) y Granizito (2727 msnm), debido a que son cauces de bajo orden presentan aforos pequeños junto con velocidades rápidas a causa de la elevada pendiente.



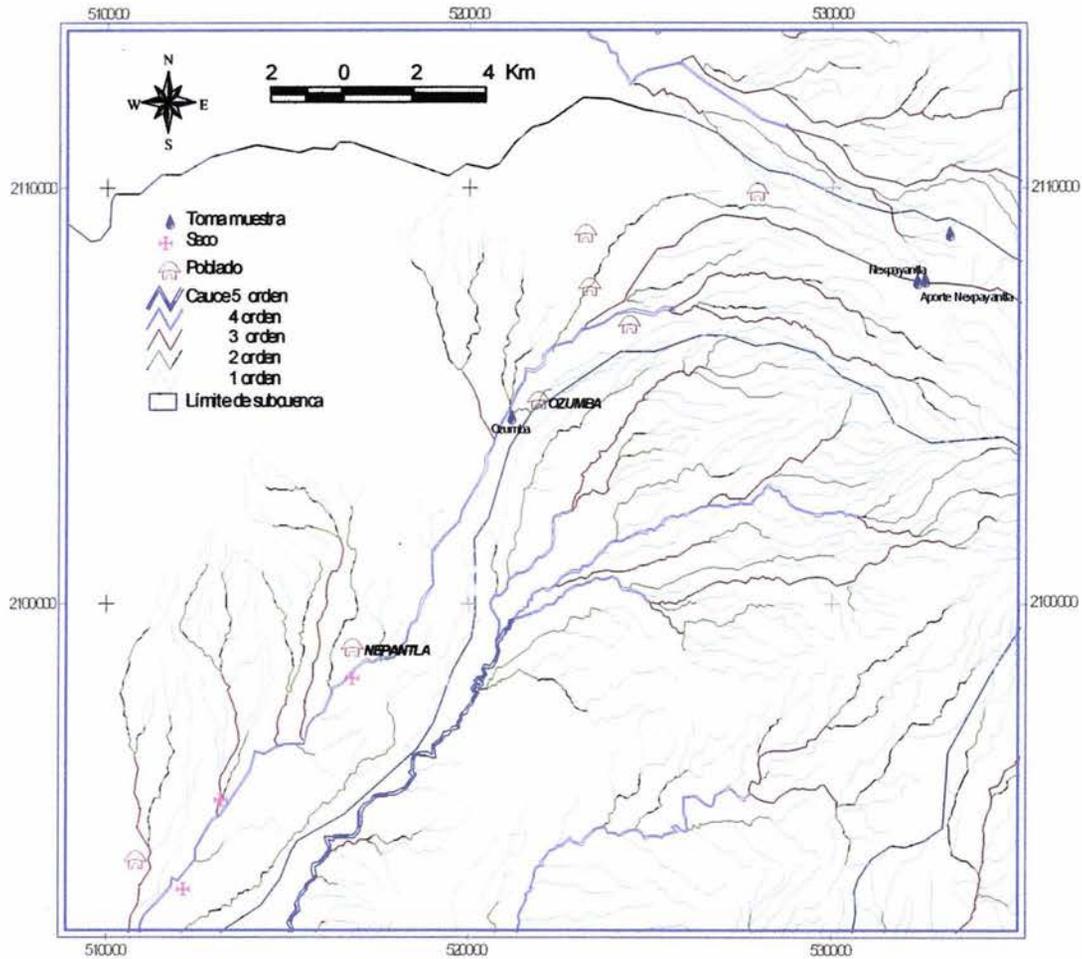
Gráfica 18. Relación entre velocidad (m/s) y aforo de la corriente (m<sup>3</sup>/s) con respecto a la altitud de la subcuenca Cuautla.

Esta subcuenca presenta 16 puntos secos, y es la que posee el mayor número de cauces perturbados (9 registrados), junto con 2 entubados y una caja de agua. De los primeros, 10 son de primer orden que no necesariamente llevan agua ya sea porque las escorrentías no se forman a falta lluvia o porque existe una gran infiltración al subsuelo; los restantes puntos son de segundo orden (5 sitios) y tercer orden (1 punto), que se ubican muy cerca de las zonas urbanas, lo que hace suponer que son entubados en las partes altas y captadas en sistemas de almacenamiento para posteriormente ser utilizada el agua para diferentes fines, principalmente de abastecimiento a poblaciones cercanas como Ocuituco, Yecapixtla, Texcala y Metepec, y para la recreación. Los dos sistemas entubados que se registraron se encuentran muy cerca uno del otro (mapa 5), uno de ellos conectado a una caja de agua, cuya finalidad ya se mencionó. Por último, el impacto que ha sufrido el estado de Morelos por el incremento de la población y la explotación de los recursos naturales con fines recreativos se refleja en los 9 sistemas perturbados, 4 de ellos en los alrededores del poblado de Yecapixtla y otros 4 cerca de Ocuituco (que son unas de las

poblaciones más grandes dentro de ésta subcuenca), encontrándose con una gran cantidad de basura, descargas de drenaje directa de las casas que contienen una gran cantidad de jabón, y en uno de esos puntos se observó una cantidad considerable de basura principalmente cajas de empaque proveniente de un rastro a orillas del cauce de este punto y que pasa por Yecapixtla. El último sitio perturbado se registró muy cercano a los Estanques intercomunicados, en donde se identificó alteración a causa de las actividades agrícolas que se llevan a cabo en esa zona, quizá por la captación de agua del cauce y convirtiéndolo en depósito de basura.

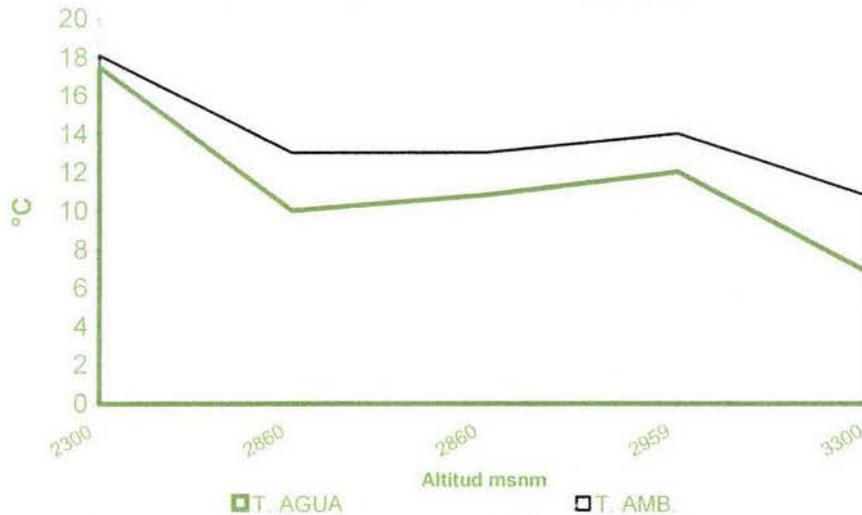
## SUBCUENCA DE AMECAMECA

La ubicación del estado de México se define como cabecera de las cuencas principales de los ríos Lerma, Balsas y Pánuco. Esta situación ayuda a que las aguas superficiales en tránsito por el estado, se utilicen para satisfacer las necesidades que requieren las diversas actividades que se desarrollan en él (INEGI, 2001).



Mapa 6. Ubicación de los puntos de monitoreo en la subcuenca Amecameca.

## TEMPERATURA



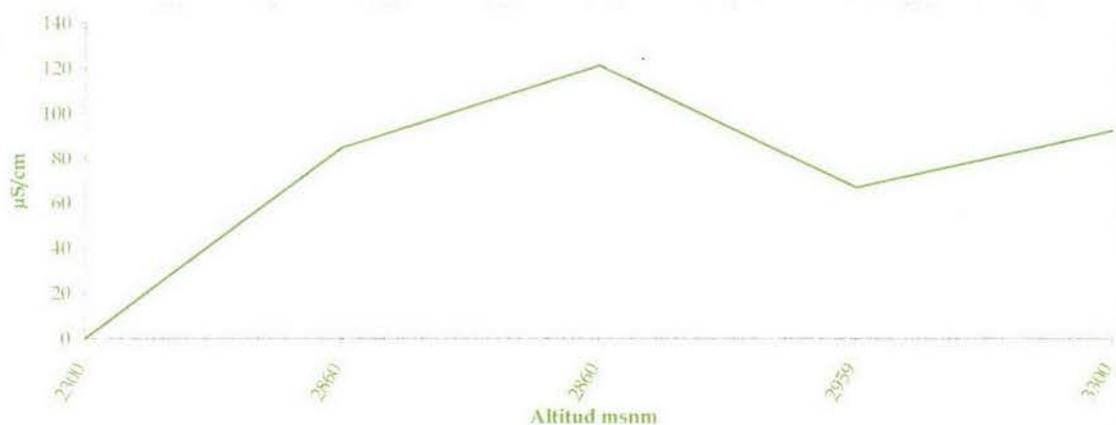
Gráfica 19. Comparación térmica con respecto a la altitud de la subcuenca Amecameca.

Los valores de la grafica 19 muestran variaciones de temperatura del agua de 6.7 a 17.5 °C y ambiente de 10.7 a 18.1 °C; el punto denominado Ozumba registra el valor más alto de temperatura del agua (a la altitud más baja, diciembre 2001), el cual se atribuye a que el muestreo se realizó a las 14 horas, cuando la intensidad de los rayos solares son fuertes, incrementando la temperatura tanto del agua como la del aire; en Nexpayantla (2860 msnm) se tiene doble muestreo con diferencia de dos meses, lo que implica que se realizaron registros distintos (julio/septiembre 2001, verano y otoño) resultando una mínima diferencia (0.8°C) entre las temperaturas de ambos puntos indicando una estabilidad ambiental; Aporte Nexpayantla (2959 msnm), se muestreo en verano (julio 2001) a las 12 horas presentando un ligero aumento de temperatura del agua (12°C), al compararse con el punto Nexpayantla (10°C, primera visita) (mismo día y a pocos metros de distancia), se tiene una diferencia de 2°C, aunque ésta no es mucha, se puede explicar con el hecho de que el aporte presentaba un volumen y una profundidad mucho más pequeño provocando un rápido calentamiento en el agua. Finalmente, La Calzada (3390 msnm, octubre 2001) presenta la temperatura más baja, debido a que sus aguas provienen de deshielo del volcán Popocatepetl.

## CONDUCTIVIDAD

En los puntos registrados de esta zona, los valores de conductividad que se obtuvieron son bajos (de 0.1 a 121  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) de acuerdo con las pocas cantidades de sales que se encuentran con forme a los valores de alcalinidad, dureza y sulfatos presentes. Nexpayantla (2860 msnm, segunda visita) presenta la mayor cantidad de sales (121  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), superior al registro de dos meses antes (de 84.8); en este caso se debió a la estación del año en la que se llevó a cabo el muestreo (otoño), aumentando con el contenido de sales electrolizables disueltas, la movilidad de los iones, la cantidad de sales provenientes de Aporte Nexpayantla y también con la velocidad del agua, además de que la evaporación del agua incrementa su concentración, mientras que en Nexpayantla (primera visita) el muestreo se llevó a cabo en época de lluvia cuando el acarreo de materiales provenientes de las partes altas, a consecuencia de la erosión provocada por la

lluvia y el agua proveniente del deshielo, en contacto con el suelo, va conduciendo a una mayor irregularidad de las sustancias disueltas en el agua a causa de la dilución en ésta. En cuanto a La Calzada (3390 msnm), su conductividad (92.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) se debe a que el escurrimiento presenta bajo aforo y velocidad, lo cual provoca un escaso arrastre de iones por erosión. Por otro lado, Ozumba (2300 msnm), presenta la conductividad más baja registrada (0.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), aunque la alcalinidad y dureza indican la presencia de iones y sales que pueden estar enmascarados por moléculas de compuestos orgánicos no disociados en el agua, como menciona Jiménez (2002) los cuales tienen una conductividad muy escasa o nula y tomando en cuenta que en el sedimento existe una gran cantidad de materia orgánica, la resuspensión de esta a causa del movimiento de la corriente permite una mayor interacción con los iones, rodeándolos y afectando la lectura de la conductividad.

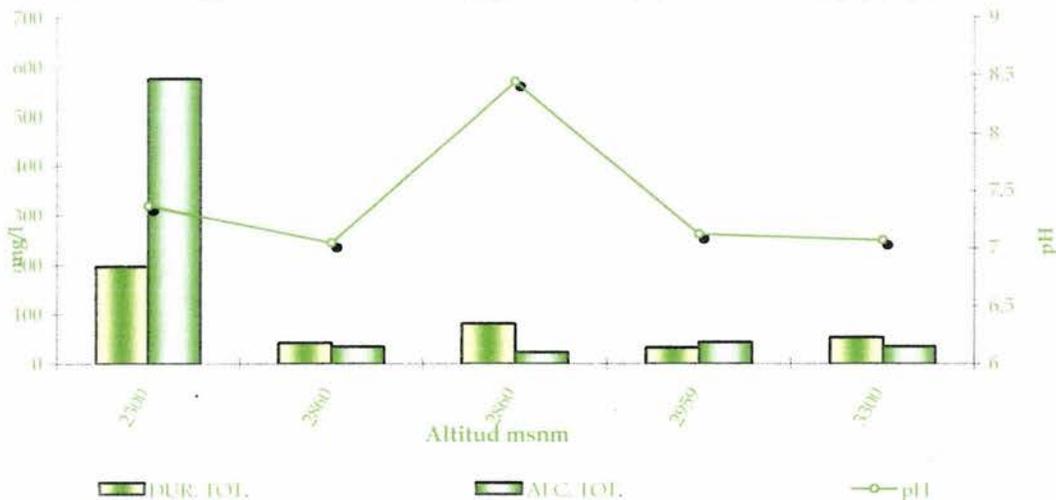


Gráfica 20. Comportamiento de la conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca Amecameca.

## ALCALINIDAD, DUREZA TOTAL, DUREZA DE CALCIO Y pH

Los valores que se registran para los cinco puntos de toma de muestra, varía de 23 a 575  $\text{mg}/\text{l}$  de  $\text{CaCO}_3$ , con baja alcalinidad en Nexpayantla (2860 m, primera toma de muestra) en donde se observa un decremento en la siguiente visita; así mismo Aporte Nexpayantla (2959 m, 43.7  $\text{mg}/\text{l}$  de  $\text{CaCO}_3$ ) y la Calzada (3300 m, 34.5  $\text{mg}/\text{l}$  de  $\text{CaCO}_3$ ) tienen alcalinidades débiles, en tanto que Ozumba (2300 m) la presenta muy intensa.

Con respecto a la dureza total los valores oscilan de 32.28 a 197.28  $\text{mg}/\text{l}$  de  $\text{CaCO}_3$ , cuyos sitios presentan aguas blandas (Aporte Nexpayantla, la Calzada y Nexpayantla, primera visita), moderadamente dura (Nexpayantla, segunda visita) y dura (Ozumba). En cuanto a las cantidades de calcio, en todos los puntos son menores a la dureza total, presentando un intervalo de 21.52 a 134.51  $\text{mg}/\text{l}$  de  $\text{CaCO}_3$ , y los datos de pH se encuentran cercanos a la neutralidad (7.05 a 7.37), excepto Nexpayantla (segunda visita) que fué de 8.44.



Gráfica 21. Relación de la alcalinidad total (mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ), dureza total (mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ) y pH, con respecto a la altitud de la subcuenca Amecameca.

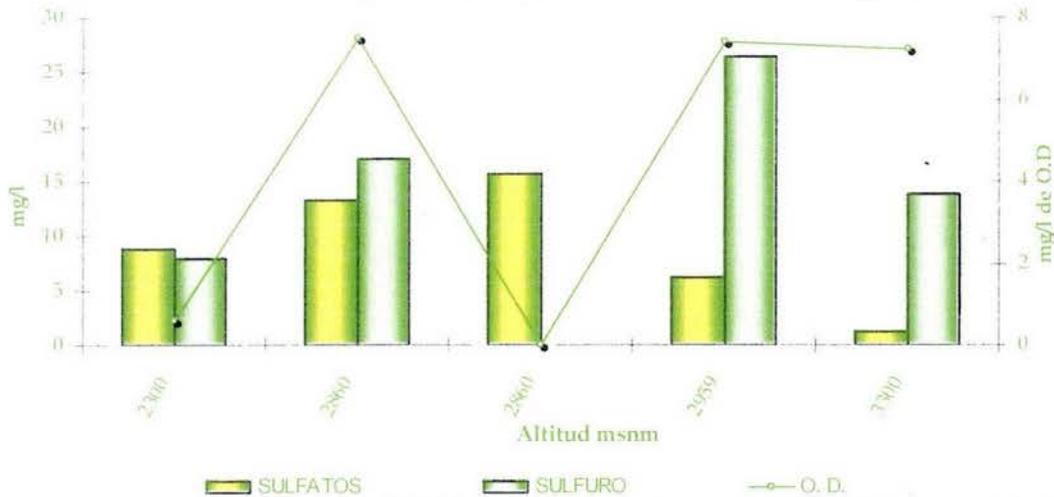
De los resultados de alcalinidad (gráfica 21) destaca Ozumba (2300 msnm) que rebasa los 150 mg/l que menciona Arrignon (1984), a las cuales considera aguas incrustantes, muy duras (con frecuencia magnésicas) y que corresponden a cursos de agua que pasan por capas salinas; la predominancia del ion calcio y el exceso de iones bicarbonato, forman su reserva alcalina asociados con iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  provenientes de la meteorización de los aluminosilicatos en el suelo sumergido, según Baird (2001) y en mayor medida por las descargas de drenaje del poblado de Ozumba que aportan una considerable cantidad de sales que incrementan la alcalinidad de manera substancial, cuyo pH cercano a la neutralidad nos sugiere una buena capacidad amortiguadora.

En Aporte Nexpayantla (2959 msnm), el grado de alcalinidad que existe es muy baja debido a la incipiente cantidad de sales que se encuentran disueltas en el agua, siendo el bicarbonato el ion predominante, y que esta asociado a iones monovalentes como el sodio y potasio (Romero, 1999), este escurrimiento presenta agua blanda debida al calcio, y junto con su baja alcalinidad, tiende a poseer una pobre capacidad amortiguadora (Payne, 1986).

En el punto Nexpayantla (2860 msnm, primera y segunda visita), la alcalinidad (34.5 y 23 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ , respectivamente) resultó menor que la dureza (43.04 y 80.71 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ) lo que indica que además de los bicarbonatos existen sulfatos, que confieren al agua cierto grado de dureza, la diferencia de alcalinidades es de 11.5 mg/l, y lo suficientemente significativa como para pasar de aguas poco alcalinas a una alcalinidad excesivamente débil; con esto, según Payne (1986) y Margalef (1983), se altera su capacidad amortiguadora lo que denota un aumento en el flujo de la escorrentía variando la cantidad de sales disueltas, principalmente bicarbonatos que están asociados a iones sodio o potasio, en este sitio se observa un aumento de iones calcio y magnesio, cambiando las aguas de blandas a poco duras, como consecuencia del arrastre y erosión del suelo en las zonas de mayor altitud, donde son aguas con un sistema tampón débil, debido a la escasa reserva alcalina que presenta, lo cual hace que su pH se desvíe en más

de una unidad de una fecha a otra. Respecto a los demás puntos, registran pH con tendencia a la neutralidad, valores que se encuentran dentro de las establecidas por las Normas Oficiales Mexicanas para aguas naturales (6.5 a 8.5).

## SULFUROS, SULFATOS Y OXIGENO DISUELTO



Gráfica 22. Relación entre sulfuros (mg/l), sulfatos (mg/l) y oxígeno disuelto (mg/l) con respecto al gradiente altitudinal de la subcuenca Amecameca.

El azufre se presenta en dos formas inorgánicas y que son el sulfuro de hidrógeno y el ión sulfato (Ramos, 2001). La cantidad de sulfatos es importante, entre otras cosas, por que ocasiona dureza en el agua, las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  en los sistemas de ésta subcuenca indican que se trata de aguas ligeramente sulfatadas, encontrándose dentro de los límites normales para aguas naturales según Wetzel (2001), que va de 5 a 30 mg/l, con un promedio de 11 mg/l, y Lind (1985) extendiendo éste intervalo de 5 a 50 mg/l.

De acuerdo a lo anterior, las constantes emanaciones del volcán Popocatepetl que se han dado en los últimos años, han alterado a dichos sistemas puesto que los valores de sulfuros y sulfatos son relativamente altos (gráfica 22), que van de la ausencia a 26.41 mg/l y 1.29 a 15.63 mg/l, respectivamente.

Se observó que para ambos iones en el punto Ozumba (2300 msnm), la materia orgánica es la determinante en el aporte de estos, provenientes del agua residual doméstica del poblado del mismo nombre principalmente, con valores similares de sulfuros (8.01 mg/l) y sulfatos (ligeramente mayor con 8.86 mg/l). Esto indica que hay una rápida formación de  $\text{S}^{2-}$  a partir de la materia orgánica presente en el sedimento (16.75 %), pero que al mismo tiempo se efectúa la oxidación de estos a sulfatos, por lo que el oxígeno esta siendo utilizado en esta reacción y se presenta una tasa de desoxigenación muy alta, siendo removido casi totalmente el  $\text{O}_2$  del agua (0.6 mg/l) por el consumo en la descomposición del alto contenido de materia orgánica en el sedimento y la oxidación de sales inorgánicas provenientes de los aportes de drenajes, limitando así, según Gordon *et al.* (1992), Hernández y Rivera (1996) y Winkler (1986), la capacidad de autpurificación de la corriente y creando condiciones muy desfavorables para la vida acuática del lugar, por otro lado, el azufre en la forma de ácido sulfúrico diluído ayuda a solubilizar el calcio

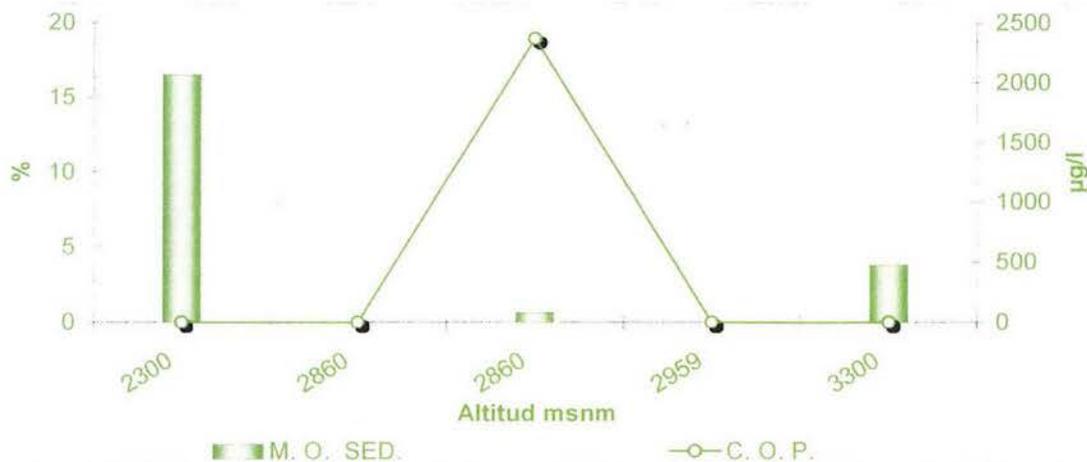
y otros minerales de las rocas, ocasionando el aumento de cationes y aniones que incrementan la dureza (121 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ), o bien por la presencia de bacterias reductoras de sulfatos que, como menciona Jiménez (2002), incrementan la cantidad de iones sulfuro hasta casi igualar a la de sulfatos.

En Nexpayantla (2860 msnm) se observa una oxidación completa de  $\text{S}^{2-}$  hacia  $\text{SO}_4^{2-}$  en un lapso de dos meses, en la primera visita se presentaron condiciones óptimas de oxigenación favoreciendo este proceso. Mientras que en Aporte Nexpayantla (2959 msnm) y La Calzada (3390 msnm), el proceso de oxidación de los sulfuros fue muy lento donde se presentaron las mayores concentraciones (26.41 y 13.72 mg/l, respectivamente) de estos y las menores de sulfatos (6.21 y 1.29 mg/l), debido a un menor tiempo de contacto de los iones con el oxígeno presente como para poder llevar a cabo la reacción hacia  $\text{SO}_4^{2-}$ .

En estos puntos se presentan concentraciones de oxígeno disuelto que varían de 0.6 a 7.5 mg/l, la mayoría con niveles cercanos a la saturación, lo que indica una baja tasa de desoxigenación, en donde existe una reserva de oxígeno como amortiguador para mezclarse con cualquier contaminante que pueda estar presente; a excepción de Ozumba cuya baja concentración se debe en gran parte a lo ya mencionado.

## MATERIA ORGÁNICA DEL SEDIMENTO Y CARBONO ORGÁNICO PARTICULADO

Ozumba (2300 msnm) presenta un sedimento muy rico en materia orgánica con un porcentaje extremadamente elevado (16.75 %), ya que las descargas de desechos domésticos de la población del mismo nombre, ocasiona una desoxigenación; mientras que en La Calzada (3390 msnm) se tiene un sedimento rico (3.78%) en este material por la acumulación de desechos vegetales circundantes al punto, los cuales se van sedimentando ya que la velocidad que lleva la corriente lo permite, por otro lado, en Nexpayantla (2860 msnm, segunda visita) se registra un sedimento pobre (0.64%), debido a la escasa vegetación que se encontraba a orillas del cauce junto con la mediana velocidad que impide una rápida sedimentación.



Gráfica 23. Relación entre materia orgánica del sedimento (%) y carbono orgánico particulado ( $\mu\text{g/l}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca Amecameca.

En cuanto al carbono orgánico particulado, las concentraciones que presentan Ozumba (2752  $\mu\text{g/l}$ ) y Nexpayantla (2369  $\mu\text{g/l}$ ), no influyen de manera significativa en el comportamiento del sistema, ya que su presencia en el sitio está determinada por el movimiento de la corriente.

## VELOCIDAD Y AFORO DE CORRIENTE



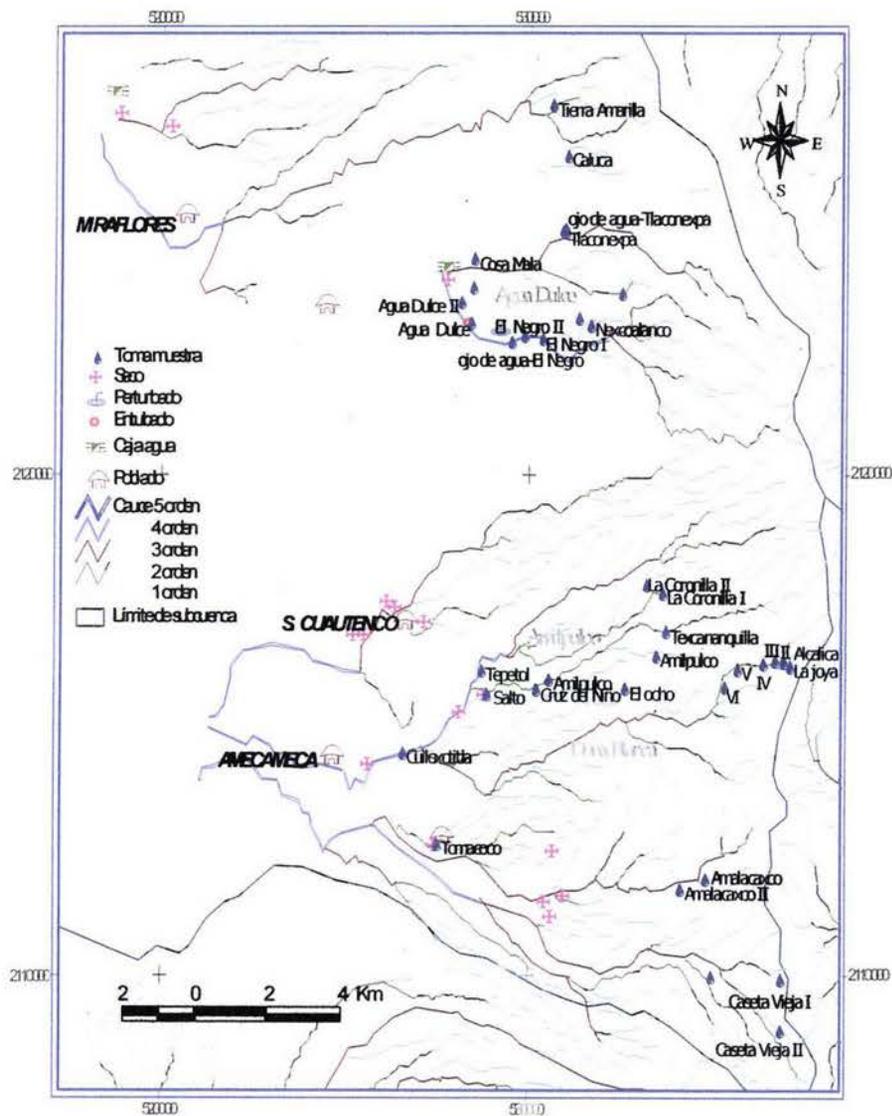
Gráfica 24. Relación entre velocidad (m/s) y aforo de la corriente ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca Amecameca.

Esta subcuenca presenta corrientes con velocidades lentas en la Calzada (0.2 m/s) y Aporte Nexpayantla (0.18 m/s), y medias en Ozumba (0.277 m/s) y Nexpayantla (0.312 m/s), junto con aforos que se registran de 0.001 a 0.126  $\text{m}^3/\text{s}$ , determinándose como cauces ocasionales según el cuadro 5 del Anexo, en Nexpayantla (segunda visita) no se registró dato. Estas velocidades no presentan un comportamiento típico de cauces de montaña, ya que en las mayores altitudes se presentan velocidades lentas y van aumentando hacia las bajas, sin que se vean influidas por las características geológicas de la zona, sino más bien por el aumento de los órdenes del cauce, cuyos aforos también aumentan con estos.

Dentro de esta subcuenca se ubican tres puntos secos en el momento del muestreo, a falta de escurrimientos por la estación seca; dos de ellos, se ubican en el mismo cauce (de cuarto orden), en diferente altitud y una separación aproximada de 2 a 3 kilómetros, el cual podría estar entubado o desviado hacia la población de San Miguel Nepantla, que se ubica muy cerca de estos, lo que provoca un desequilibrio y falta de humedad en el ambiente hacia las partes bajas del cauce. Entre estos dos puntos se registró la unión del cauce donde se ubica el último punto seco, el cual es de tercer orden e intermitente, que seguramente los efluentes de orden menor que vierten en él son de ocasión y en el momento de muestra no conducían agua.

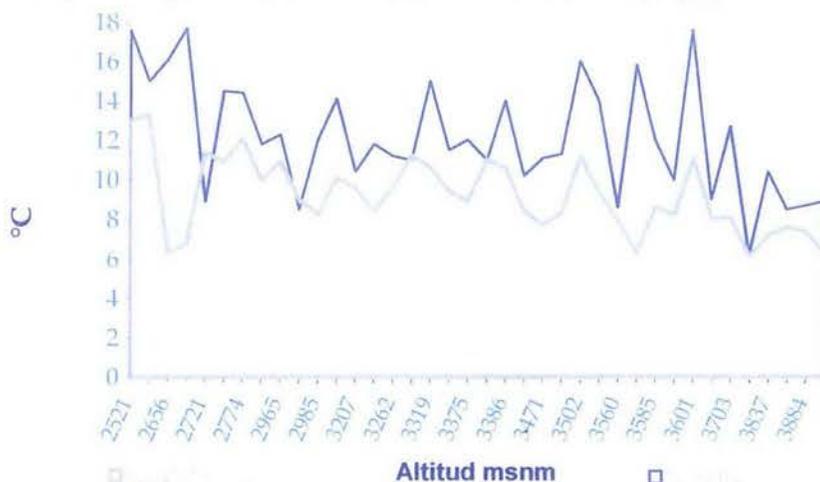
## SUBCUENCA DE LA COMPAÑÍA

En la zona que es el límite noroccidental del área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo confluyen escurrimientos de la vertiente occidental del Iztaccíhuatl y de las elevaciones meridionales de la Sierra del Río Frío que drenan hacia el Lago de Texcoco en la Cuenca de México. Algunas de estas corrientes se pierden al tocar la planicie debido probablemente a la permeabilidad del terreno. Por otro lado, algunos arroyos vierten su caudal en canales artificiales que son utilizados para la irrigación del Distrito de Riego de Chalco o son entubados para abastecer a las poblaciones cercanas. Ocasionalmente se aprovechan las caídas de agua para generación de energía eléctrica (Chávez y Trigo, 1996).



Mapa 7. Ubicación de los puntos de monitoreo de la subcuenca De la Compañía.

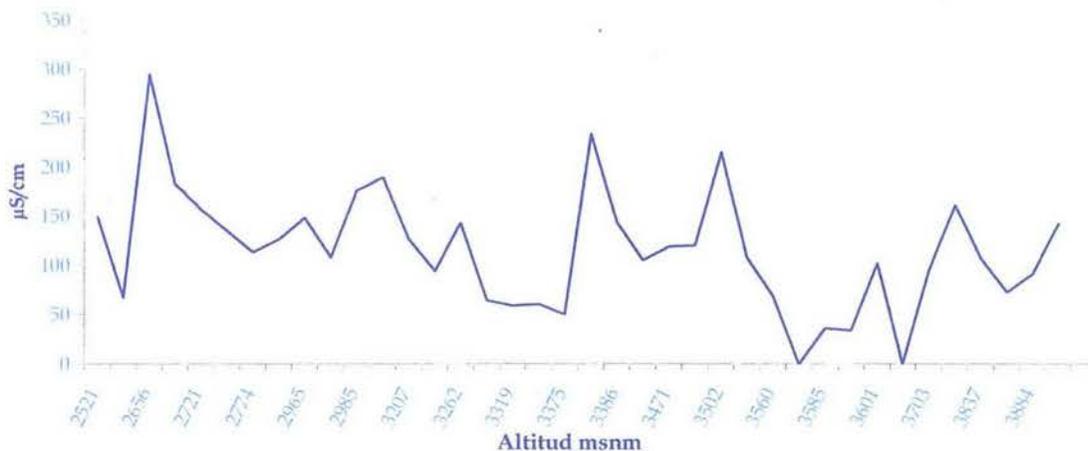
## TEMPERATURA



Gráfica 25. Comparación térmica con respecto a la altitud de la subcuenca De la Compañía.

En la gráfica 25, se muestran las temperaturas tanto la ambiental como la del agua con un intervalo de esta última de 6.1 a 13.3 °C y la ambiente de 6.2 a 17.7 °C, las cuales presentan un comportamiento irregular, en donde la temperatura del agua se encuentra directamente influenciada por la temperatura ambiente ya que la presencia de corrientes de aire, la profundidad de las cañadas y la abundante vegetación determinan la disminución de la temperatura siendo siempre menor la del agua a la del ambiente, a excepción del punto Agua dulce I (2721 msnm) en donde la diferencia entre ambas es de 2.5 °C, la cual se puede justificar por la hora de toma de muestra (18:10 hrs), en donde la acumulación de la energía calorífica en el agua y en el sedimento durante el día se mantiene estable liberándose muy lentamente.

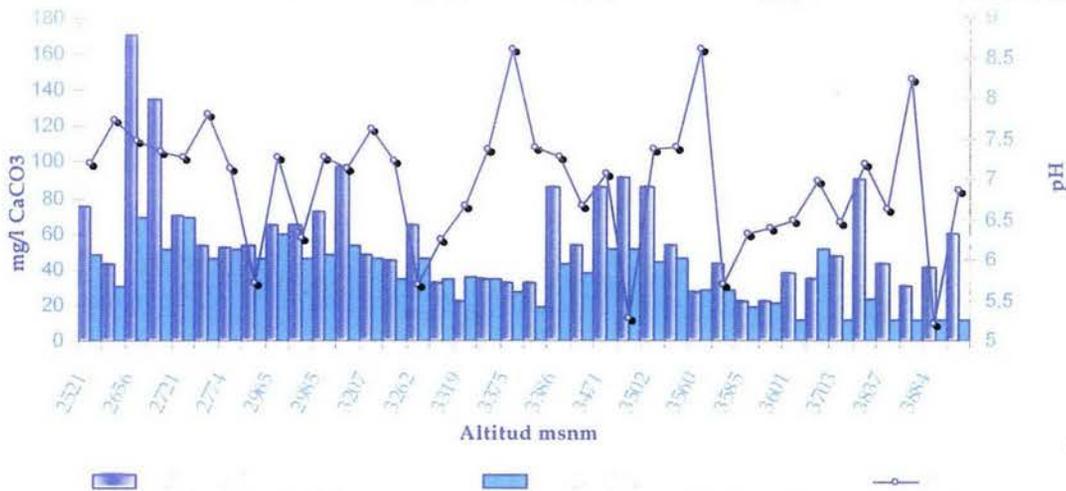
## CONDUCTIVIDAD



Gráfica 26. Comportamiento de la conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ ) con respecto a la altitud en la subcuenca De la Compañía.

En la gráfica 26, se registran valores de 0.01 a 295  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el comportamiento oscilante de este parámetro es a causa de una acumulación de sales por la erosión de la roca y el acarreo de material iónico de las partes más altas, este fenómeno afecta principalmente a Texcananquilla (3502 msnm), Amilpulco I (3382 msnm) y Salto (2656 msnm) que muestran los valores más altos, por el contrario en el punto Caseta Vieja II (3650 msnm) se presenta un valor de 0.01  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , cuyos iones y sales pueden ser enmascarados por la presencia de moléculas de compuestos orgánicos no disociados en el agua los cuales no permiten una buena conductividad y finalmente en el punto la Ardilla (3568 msnm) no se tiene registro marcándose en la gráfica como cero.

### ALCALINIDAD, DUREZA TOTAL, DUREZA CALCIO Y pH



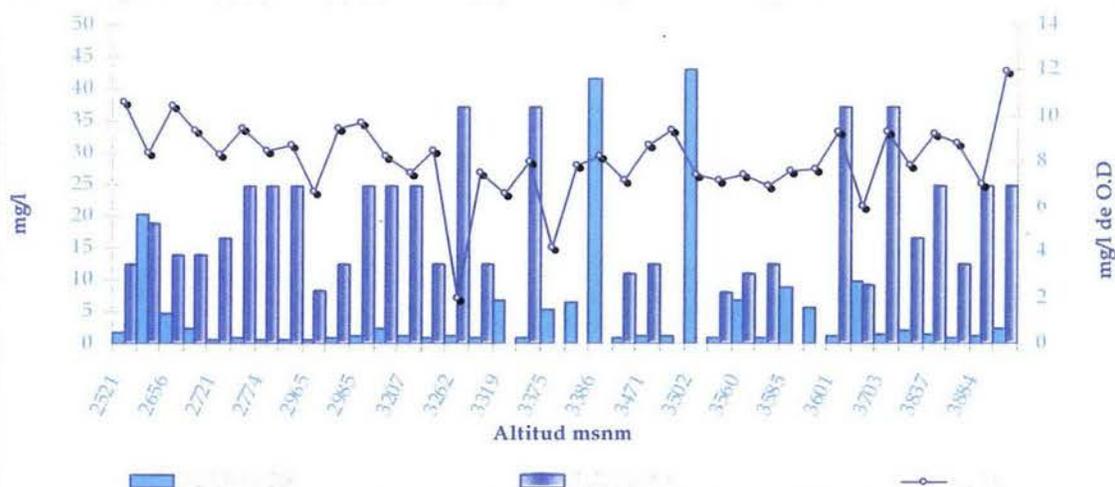
Gráfica 27. Relación de la alcalinidad total (mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ), dureza total (mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ) y pH, con respecto a la altitud de la subcuenca De la Compañía.

En la subcuenca se tiene un predominio de alcalinidad débil, cuyos valores van de 11.50 a 69  $\text{mg}/\text{l CaCO}_3$ , con presencia de aguas blandas a moderadamente duras (21.52 a 179.58  $\text{mg}/\text{l CaCO}_3$ ), las cuales se encuentran por debajo del límite máximo permisible que establecen las NOM-ECOL-001-1996 para aguas naturales (500  $\text{mg}/\text{l CaCO}_3$ ); y la dureza de calcio presenta valores que oscilan de 5.38 a 161.41  $\text{mg}/\text{l CaCO}_3$ .

El comportamiento de la alcalinidad indica que la erosión y disolución de los componentes de las rocas y el suelo no es tan severa, con lo cual la acumulación de sustancias disueltas es mínima manteniendo una nula reserva alcalina, modificando así su sistema buffer por lo que se presentan en algunos puntos tendencia a la acidez. Comparando este parámetro con la dureza se tiene que la que corresponde a la carbonatada esta dada en la mayoría de los casos por el valor de la alcalinidad (lo cual se ve reflejado con la correlación, tabla 2 Anexo) asociándose los iones calcio y magnesio a otros elementos como sulfatos, cloruros, silicatos, nitratos o boratos, que provocan dureza no carbonatada, bajo estas condiciones se encuentran dos casos extremos -Salto, 2656 msnm, 170.38  $\text{mg}/\text{l CaCO}_3$  y Tepetol, 2657 msnm, 134.51  $\text{mg}/\text{l CaCO}_3$ - en los que la diferencia es muy marcada.

Para el pH se presentan valores desde ligeramente ácidos a alcalinos (5.22 a 8.6), aunque la mayoría presenta tendencia a la neutralidad; existen puntos que se encuentran por debajo del límite que establecen las Normas Oficiales Mexicanas para aguas naturales (6.5 a 8.5), estos son Negro II (2965 msnm), ojo de agua-Tlaconexpa (3262 msnm), Nexcoalanco (3499 msnm), la Ardilla (3568 msnm) y Alcalica II (3884 msnm), cuya acidez se atribuye a la presencia de  $\text{CO}_2$  que según Romero (1999) es producto de la descomposición y oxidación de la materia orgánica tanto del sedimento como la particulada, este tipo de agua reacciona más fácilmente con las rocas del lugar, lo que ocasiona un mayor arrastre de sales carbonatadas y no carbonatadas que contienen calcio y/o magnesio.

### SULFUROS, SULFATOS Y OXÍGENO DISUELTOS



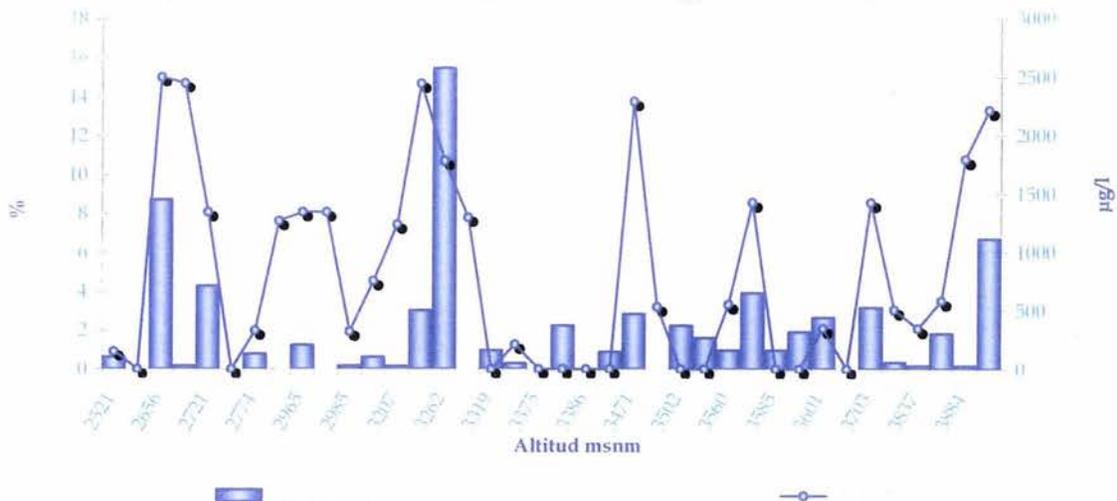
Gráfica 28. Relación entre sulfuros (mg/l), sulfatos (mg/l) y oxígeno disuelto (mg/l) con respecto al gradiente altitudinal de la subcuenca De la Compañía.

El azufre presente como  $\text{SO}_4^{2-}$  (de 0.58 a 43.04 mg/l) y  $\text{S}^{2-}$  (desde la ausencia hasta 37.10 mg/l) es muy fluctuante y está determinado en gran parte por la presencia de materia orgánica ya que, según Metcalf y Eddy (1981), es liberado en la degradación de las proteínas contenidas en éstas. Debido al aporte de esta fuente y a la actividad volcánica reciente de la zona, las concentraciones del sulfuro en las partes de altitud mayor a 3601 msnm se han visto afectadas, registrándose algunos puntos con valores altos, esto quiere decir que el ciclo del azufre se encuentra en un proceso inicial ya que la cantidad de sulfatos presentes, como producto final de este ciclo, es pequeña. En cambio en las altitudes que corresponden al intervalo de 3319 a 3601 msnm el comportamiento se invierte, destacando los puntos El Ocho (3319 msnm), Texcananquilla (3502 msnm), Amilpulco I (3382 msnm), Nexcoalanco (3499 msnm), Amalacaxco II (3375 msnm), La Coronilla I y II (3585 y 3590 msnm, respectivamente) y Cruz del Niño (3386 msnm), en donde la ausencia de sulfuros indica una oxidación parcial o total de éste completándose así el ciclo del azufre ya que se registra una cantidad de sulfatos que aunque se ubican dentro del intervalo de aguas naturales (5 a 50 mg/l, Lind, 1985), se considera que son altas para estos tipos de sistemas, hacia las partes bajas de esta subcuenca las cantidades de sulfuros se ven incrementadas debido a la influencia de las actividades antropogénicas

que se desarrollan en las zonas cercanas a los sitios de muestreo, cuyo proceso de oxidación se presenta muy lento ya que la presencia de sulfatos es escasa.

El oxígeno disuelto presenta concentraciones de 2 a 11.91 mg/l, la mayoría de los puntos se encuentran cercanos a saturación o sobresaturados, lo que hace suponer la existencia de organismos fotosintetizadores, además del movimiento del agua que presenta velocidades lentas hasta muy rápidas, en cambio para el punto ojo de agua-Tlaconexpa (2 mg/l, 3262 msnm) el consumo de oxígeno para la degradación de materia orgánica (15.48 %) y la oxidación de los sulfuros da como resultado una baja concentración, esta masa de agua se puede calificar como alterada, según Stoker y Seager (1981), debido a que la concentración de oxígeno disuelto desciende por debajo del nivel necesario para mantener una biota normal, que Lind (1985) menciona de 3 mg/l o menos el cual es estresante para la vida acuática; además en Amalacaxco II (3375 msnm), se tiene un nivel bajo de saturación (4.2 mg/l) donde no hay presencia de materia orgánica lo que implica que existen otros procesos que requieren de oxígeno, el cual es utilizado para la oxidación total de los sulfuros.

## MATERIA ORGÁNICA DEL SEDIMENTO Y CARBONO ORGÁNICO PARTICULADO

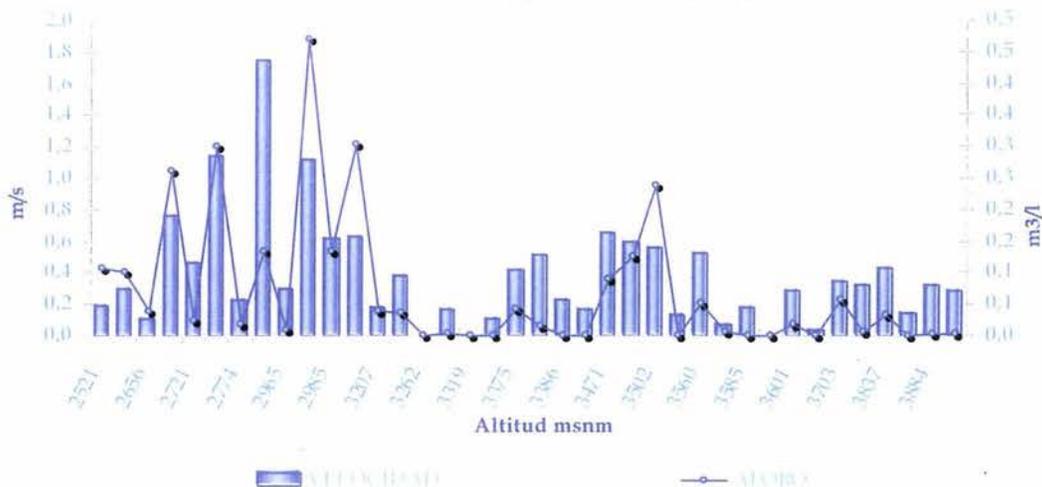


Gráfica 29. Relación entre materia orgánica del sedimento (%) y carbono orgánico particulado ( $\mu\text{g/l}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca De la Compañía.

Dentro de esta subcuenca predominan los sedimentos con un contenido de materia orgánica de mediano a extremadamente rico, aunque también se presentan sedimentos pobres y extremadamente pobres, cuyos valores oscilan de cero a 15.48 % y los datos que presenta el COP es de 151.93 a 2505  $\mu\text{g/l}$ . El comportamiento descrito en la gráfica 29 muestra que en las altitudes superiores a 3319 msnm existe un mayor número de sitios que presentan materia orgánica predominando los sedimentos con contenido mediano; mientras que en las partes bajas se tienen cantidades muy variables registrando un aumento de aforo y velocidad lo que contribuye a la disminución tanto de carbono y materia orgánica del sedimento puesto que no permiten su acumulación, con casos extremos, como Ojo de agua-Tlaconexpa (3262 msnm) con 15.48 % de MO (sedimento) y COP de 1784  $\mu\text{g/l}$ , en donde hay una acumulación de desechos orgánicos provenientes de

la vegetación que rodea el lugar, y en Salto (2656 msnm), tanto la MO (sedimento) (8.74 %) como la concentración de carbono orgánico particulado ( $2\,505\ \mu\text{g}/\text{l}$ ) se deben a que en el momento del muestreo se encontraba material orgánico vegetal y animal en descomposición cerca del sitio, la cual es arrastrado por la corriente y sedimentada a causa del sustrato rocoso que disminuye el movimiento. y los puntos que presentan valores superiores a los  $1000\ \mu\text{g}/\text{l}$  se encuentran dentro del intervalo que presenta Artemyev (1996) considerándose bajos, aunque también se presentan datos por debajo del intervalo mencionado y los puntos que se marcan como cero en la gráfica 29, no se cuenta con el registro.

## VELOCIDAD Y AFORO DE CORRIENTE



Gráfica 30. Relación entre velocidad (m/s) y aforo de la corriente ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) con respecto a la altitud de la subcuenca De la Compañía.

Dentro de esta subcuenca la velocidad es fluctuante, presentando flujos lentos a muy rápidos (de  $0.030$  a  $1.750\ \text{m}/\text{s}$ ), ya que depende, en la mayoría, principalmente de la época del año, la composición geomorfológica, la pendiente y la vegetación, siendo las tres primeras las que determinan la rapidez con que fluye el agua en los puntos de las partes superiores a los  $3375\ \text{msnm}$  donde predominan las velocidades medias, aunque en las partes por debajo de los  $3318\ \text{msnm}$  se presentan estas velocidades, predominan, sin embargo, las rápidas y muy rápidas, influidas por los aportes de otros escurrimientos

Por otro lado el aforo corresponde en todos los puntos a cauces ocasionales (de  $0.00008$  a  $0.471\ \text{m}^3/\text{s}$ ), la mayoría de primero, segundo y tercer orden provenientes del deshielo de los volcanes y ocasionalmente por precipitaciones, en el caso de Agua Dulce se tienen seis puntos que fueron muestreados en invierno los cuales corresponden a un cauce de cuarto orden y en donde el aforo es bajo debido a que la cantidad de agua que normalmente podría correr por el cauce se encuentra congelada; por lo tanto, el aforo como la velocidad cambian de acuerdo a la temporada.

Esta subcuenca, al igual que Cuautla cuenta con 16 puntos secos, muchos de ellos en altitudes menores a  $2700\ \text{msnm}$ , los cuales se ubicaron en la cartografía con ordenes de cauce desde el primero al tercero. Hacia la parte sureste de la subcuenca se encuentra el

81.25 % de estos puntos, 3 de ellos cercanos a la población de Amecameca, lo que hace suponer que el cauce en donde se ubicaron fue entubado, tomando en cuenta que el registro se llevó a cabo en la época de lluvias (verano), y en altitudes mayores se ubican puntos con muestra de agua, hacia al norte de éstos, en el poblado de Santiago Cuautenco, se ubican 5 puntos secos aunque no se ubican muestras de agua a mayor altitud de los mismos. Por el contrario, hacia el sur de la subcuenca se registran 5 sitios secos (con dos puntos de muestreo en las partes altas) en donde se supone que la infiltración de los escurrimientos hacia el subsuelo es muy grande, por lo que no permite que fluya sobre la superficie para formar el cauce. Cerca del poblado de San Rafael se tiene un punto seco, un entubado, un cauce perturbado y una caja de agua, además de varias tomas de muestra; esta zona es la que se encuentra más influenciada por el hombre, ya que por la utilización agrícola que existe, se encuentra entubado un cauce y es canalizado hacia una caja de almacenamiento cuya agua tienen diversos usos, especialmente en agricultura y ganado, además de desechos que resultan de estas actividades se observa que uno de los cauces se encuentra perturbado. Por último al norte de Miraflores se tienen registrados dos puntos secos que corresponden a un mismo cauce de segundo orden y posiblemente se dirija a una caja de agua que se encuentra más abajo.

---

## COMPARACIÓN Y VARIACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE DOS ESCURRIMIENTOS PRINCIPALES

En este apartado se contemplan dos de los escurrimientos de mayor importancia dentro de la zona de estudio, el Apatlaco-Alseseca-Nexapa (ubicado en la subcuenca Nexapa) y Alcalica (en la subcuenca De la Compañía), cuyas variaciones se analizan tomando en cuenta los parámetros que definen mejor su comportamiento a lo largo del recorrido. A continuación se describe a cada uno de ellos.

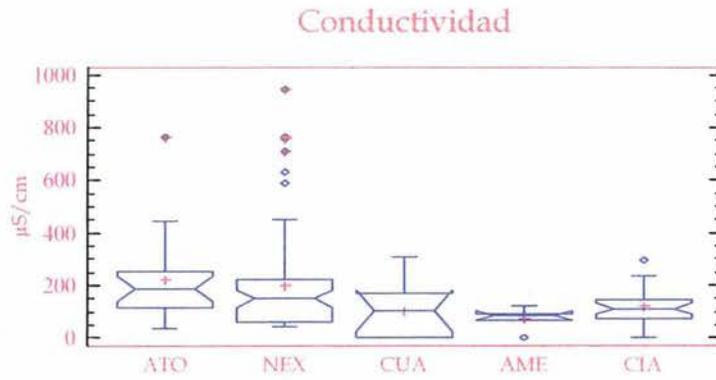
Del seguimiento que se hizo en el sistema Apatlaco-Alseseca-Nexapa (mapa 4), se tiene que en el tramo denominado Apatlaco (zona norte), tanto la conductividad, la alcalinidad, dureza total, sulfatos y aforo presentan un comportamiento característico a estos tipos de sistemas cuyos puntos de muestreo se encuentran en las partes con altitudes mayores a 2700 msnm, donde se inicia la formación de escurrimientos y por lo tanto el aforo es muy pequeño, además el contenido de sales es causada principalmente por la mineralización de las rocas; en cuanto a los sulfuros el impacto que genera las constantes emanaciones del volcán implica una mayor cantidad en el primer punto de muestra y conforme avanza el recorrido estos se oxidan manteniendo su concentración en un tramo pequeño que posteriormente sufre un fuerte aumento a causa de un afluente que aporta una cantidad considerable de compuestos de azufre, este comportamiento continúa a lo largo del recorrido pero en menor proporción; en lo referente a materia orgánica del sedimento, carbono orgánico particulado y velocidad se comportan de manera irregular (a lo largo de todo el sistema en los dos primeros parámetros) que dependen de las características geomorfológicas de la zona. Mientras que en altitudes menores a la ya mencionada, que corresponde al tramo nombrado Nexapa, se ve muy influenciado por el ramal Alseseca cuyo arrastre provoca una acumulación de sales en el punto siguiente a su unión y a partir de aquí el incremento se ve influido además por los aportes de los poblados cercanos; con respecto al aforo y velocidad, estos van aumentando conforme al recorrido por la unión de una gran cantidad de escurrimientos de diferentes ordenes, aunque hacia la parte final se registra un pequeño decremento del aforo causado por la evaporación y consumo urbano, así como la disminución de la velocidad se debe a la escasa pendiente del terreno.

En el seguimiento Alcalica (mapa 7), se tienen dos ramas que confluyen antes del punto de muestra, a estas se les dio el nombre de Doña Blanca y Amilpulco. En el primero los puntos se registraron en altitudes mayores a 3600 msnm que corresponden al área dentro del parque, a lo largo de este la alcalinidad que se presenta es débil y constante, lo mismo para el sulfato, en los dos primeros puntos registrados para este seguimiento su contenido de dureza es moderada la cual sufre una dilución que se ve reflejado en el siguiente punto, a partir de este se registran aguas blandas y la conductividad se ve reflejada bajo este mismo comportamiento; en cuanto a los sulfuros al inicio del sistema se tiene una cantidad aportada por la meteorización de la roca, ya que aquí se encuentra un afloramiento, dichos iones se van oxidando durante el recorrido, y en el siguiente punto se incrementa a causa del arrastre de los depósitos de ceniza provenientes del volcán, después hay un descenso donde nuevamente se presenta otra oxidación, y en los siguientes sitios se va acumulando debido a la erosión que provoca el sistema; las

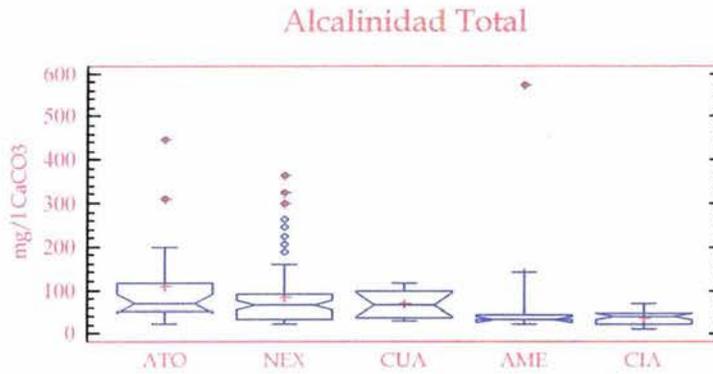
cantidades de MO del sedimento y COP son variables a lo largo del recorrido que dependen del tipo de vegetación (principalmente pasto alpino), además de que existe acumulación debido a su baja velocidad, en cuanto a esta última se mantienen en velocidades lentas aunque variables a causa de las diferentes pendientes del área, para el aforo se presentan cantidades bajas del caudal por sus características de bajo orden y de nacimiento de este sistema. Por otro lado en el tramo Amilpulco los puntos ubicados en las partes más altas se caracterizan por tener aguas moderadamente duras, alcalinidad, conductividad y COP bajas, y un sedimento con un mediano contenido de MO; hacia la parte final del tramo se ve alterado por un pequeño aporte que además de la meteorización provoca incremento en los parámetros anteriores; en cuanto a los sulfuros y sulfatos, ambos son muy variables manifestándose que en donde se encuentra una mayor cantidad de sulfatos los sulfuros disminuyen, a causa de la oxidación principalmente, y cuando sucede lo contrario es por la acumulación proveniente del mismo sistema y de otros aportes; en lo referente a velocidad y aforo hacia las partes altas ambos son altos debido a la época de lluvia en que se realizó el muestreo y en los siguientes dos puntos este comportamiento se invierte por que se encontraron cauces secos que se unen a este ramal y provocan una disminución del caudal, además de la época de secas. Finalmente el último registro de muestreo se ve alterado en todos los parámetros por la mezcla de agua de estos dos ramales (Doña Blanca y Amilpulco).

Al comparar ambos sistemas se obtuvo que la mayoría de los parámetros expresaron un comportamiento inverso a la altitud, esto significa que a mayor altitud las concentraciones de alcalinidad, dureza total, conductividad, sulfuros, sulfatos, materia orgánica del sedimento, carbono orgánico particulado, velocidad y aforo, fueron menores en comparación con los registros obtenidos en menores altitudes.

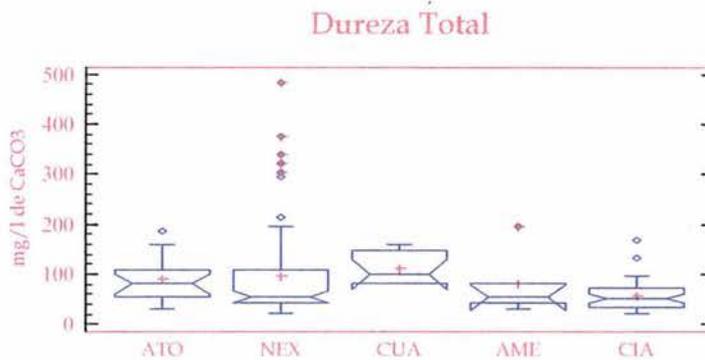
En lo escrito anteriormente, se hizo énfasis en el comportamiento y análisis de cada subcuenca, y con la finalidad de compararlas entre sí se utilizaron los siguientes diagramas de caja con los parámetros más representativos, destacando que existen ligeras diferencias entre las cuencas del Balsas (subcuencas Atoyac, Nexapa y Cuautla) y de México (subcuencas Amecameca y De la Compañía).



Gráficas 31. Comparación de las cinco subcuencas para conductividad.



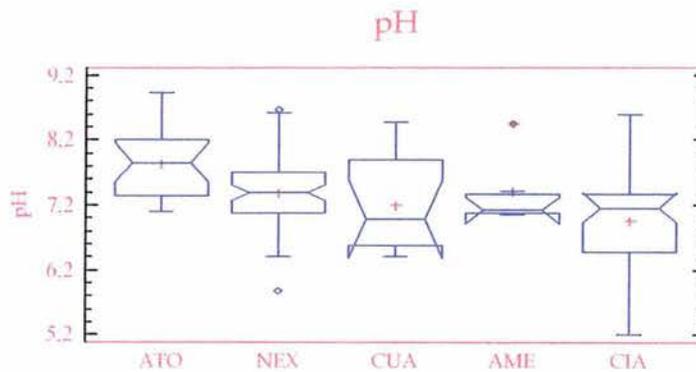
Gráficas 32. Comparación de las cinco subcuencas para alcalinidad total.



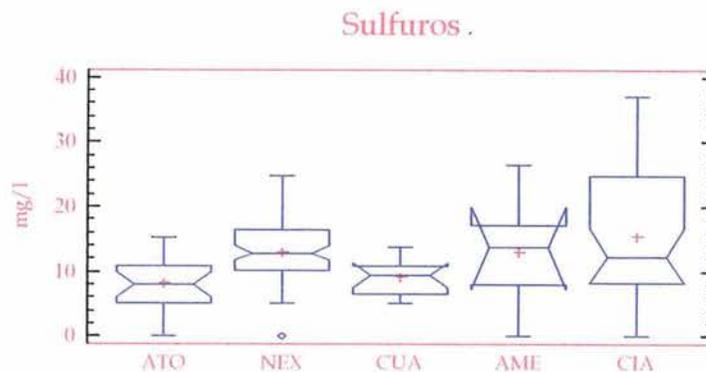
Gráficas 33. Comparación de las cinco subcuencas para dureza total.

Para la conductividad, alcalinidad y dureza total se observa que los sistemas, en todas las subcuencas, se caracterizan por tener aguas muy diluidas y que según el diagrama de Gibbs (Torres y García, 1995) predominan los procesos de mineralización, con bajas a medianas intensidades de alcalinidad, aguas blandas y moderadamente duras, aunque en las subcuencas Atoyac, Nexapa y De la Compañía se encuentran sitios con puntos extremos que confirman la alteración antes mencionada para cada caso.

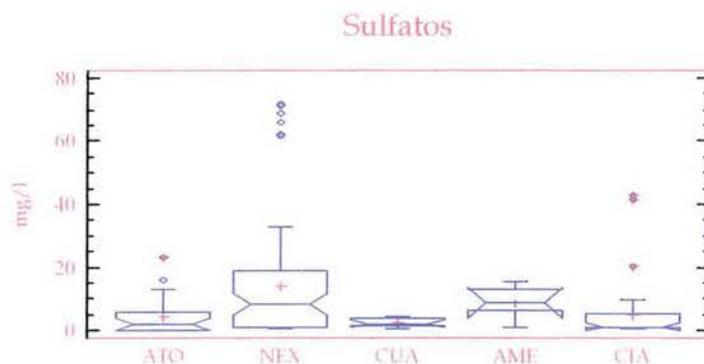
El pH presenta tendencia a la basicidad dentro de la cuenca del Balsas, mientras que en la de México se inclina a la neutralidad, cuyos valores, en la mayoría de los casos, se encuentran dentro del intervalo que presentan las Normas Oficiales Mexicanas para este tipo de aguas. Para el caso de los sulfuros se tiene que en la cuenca del Balsas la concentración no es muy variable, sin embargo en la cuenca de México los valores que registra son mayores en comparación a la anterior, esto indica una mayor influencia de la actividad volcánica.



Gráficas 34. Comparación de las cinco subcuencas para pH.

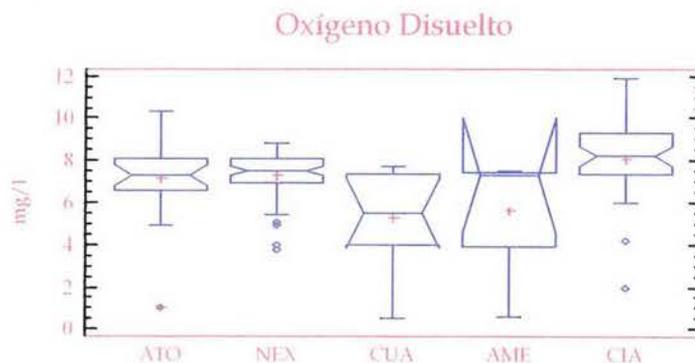


Gráficas 35. Comparación de las cinco subcuencas para sulfuros.



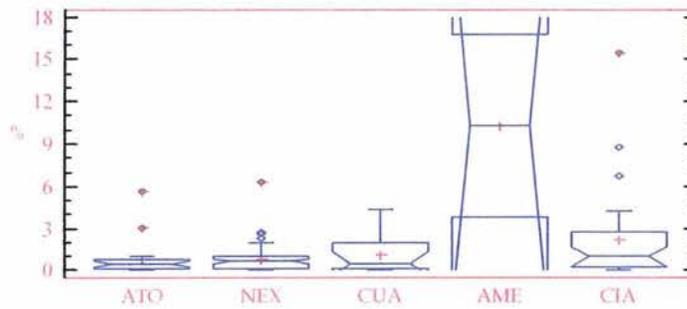
Gráficas 36. Comparación de las cinco subcuencas para sulfatos.

En cuanto al oxígeno disuelto se asocia a la concentración presente de sulfatos, ya que las altas condiciones de oxigenación de los sistemas permiten que se lleve a cabo el ciclo del azufre con eficacia, en lo que también influye la MO del sedimento, que presenta un comportamiento similar en las subcuencas Atoyac y Nexapa, y entre Cuautla y de la Compañía, en el caso de Amecameca su comportamiento se manifiesta por la presencia del punto Ozumba que presenta el mayor porcentaje.



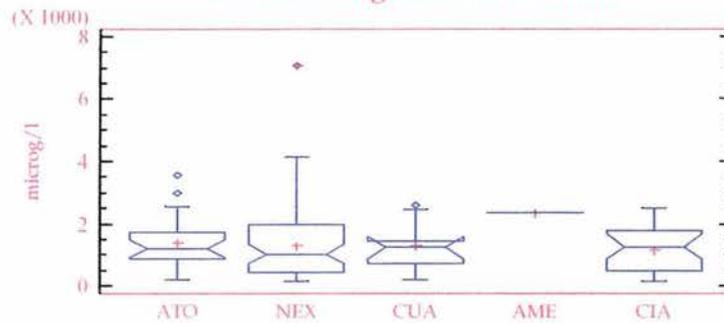
Gráficas 37. Comparación de las cinco subcuencas para oxígeno disuelto.

### Materia Orgánica del Sedimento



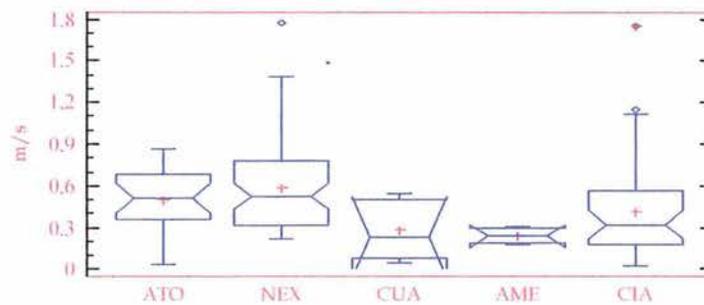
Gráficas 38. Comparación de las cinco subcuencas para materia orgánica del sedimento.

### Carbono Orgánico Particulado

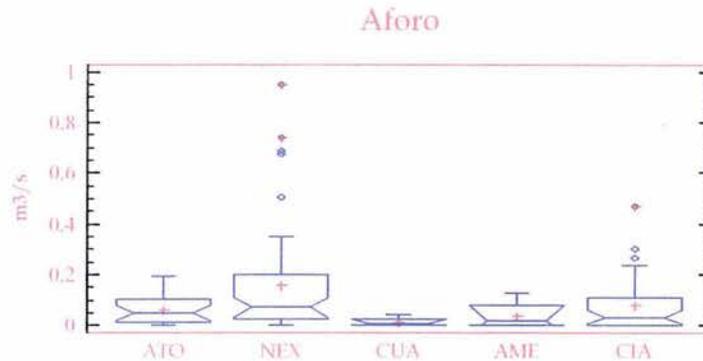


Gráficas 39. Comparación de las cinco subcuencas para carbono orgánico particulado.

### Velocidad



Gráficas 40. Comparación de las cinco subcuencas para velocidad.



Gráficas 41. Comparación de las cinco subcuencas para aforo.

Para el COP se tiene similitudes entre las subcuencas, excepto Amecameca ya que la escasa cantidad de puntos de muestreo para este parámetro no es representativo, estas concentraciones que son bajas están en función de la velocidad que presentan los sistemas, que al igual que el aforo son variables considerando que se originan del deshielo de los volcanes y por lo tanto registran valores bajos (para tener una mejor visualización en la gráfica se omitieron los puntos atípicos de la subcuenca Nexapa en el aforo), destacando que en la subcuenca de Cuautla se ubica el mayor número de cauces secos.

## CONCLUSIONES

- El número de puntos monitoreados esta en función del área de cada subcuencuena y de la accesibilidad de la zona.
- Según el análisis de correlación múltiple existe una mayor afinidad entre alcalinidad total, conductividad, dureza total, de calcio y sulfatos, el aforo con el orden, velocidad y sulfatos; los parámetros que dependen de la altitud (oxígeno y temperaturas) tienen una relación inversa, mientras que la materia orgánica, carbono orgánico particulado y pH no presentan relación con ningún otro parámetro, al igual que los sulfuros y sulfatos, sin embargo al hacer el análisis por subcuencuena se observa que la relación que existe entre estos últimos ( $S^{2-}$  y  $SO_4^{2-}$ ) es muy estrecha, así como de materia orgánica, carbono orgánico particulado con velocidad y aforo de corriente.
- La comparación entre subcuencuenas indican que hay comportamientos semejantes entre algunas de ellas, formando dos grupos que corresponden a las cuencas del Balsas y México.
- En todas las subcuencuenas la temperatura ambiente y del agua están regidas por los factores de estacionalidad, y un comportamiento típico de montaña; a excepción de la subcuencuena Atoyac que no muestra éste comportamiento y presenta una alteración en el punto donde se ubica la industria textil.
- Para la conductividad, alcalinidad total, dureza total y de calcio predominan los procesos de mineralización de las rocas y sus concentraciones dependen de la velocidad y volumen de los sistemas en cada subcuencuena, del arrastre y tipo de suelo, así como de los aportes resultado de la actividad antropogénica, de esta manera el comportamiento se incrementa con forme disminuye la altitud, que se ve afectado por las descargas de los desechos municipales e industriales, a excepción (en el caso de la conductividad) de algunos sitios donde la presencia de materia orgánica enmascara a los iones.
- En general las condiciones de pH para las subcuencuenas se presentan con tendencia a la neutralidad y a la basicidad, cumpliendo con los lineamientos de las NOM-001-ECOL-1996.
- La actividad volcánica reciente ha incrementado la cantidad de sulfuros en las zonas de mayor altitud, mientras que en las de menor altitud las actividades antropogénicas alteran las concentraciones de sulfatos.
- Las concentraciones de oxígeno dependen principalmente de la dinámica hidrológica de los sistemas.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

- Los valores de materia orgánica, carbono orgánico particulado y velocidad, dependen en gran medida de las características geomorfológicas de los sitios en que se tomó la muestra de agua.
- De manera general, el volumen de agua en el área de estudio se ve influenciado en las partes altas por la época de secas y el orden del sistema, mientras que en las partes bajas por las actividades antropogénicas.
- De acuerdo al uso y manejo que se tiene de los sistemas se clasificó a las subcuencas de menor a mayor perturbación: Atoyac, Amecameca, Nexapa, De la Compañía y Cuautla.
- En cuanto a los dos sistemas analizados se concluye que en el caso del seguimiento Alcalica se presentan condiciones naturales, sin embargo en el Apatlaco-Alseseca-Nexapa, además de presentarse estas condiciones en las partes más altas hacia las de menor altitud influye la presencia de poblados y actividad antropogénica, lo que no ocurre en el primer caso.
- A pesar de que existen influencias antropogénicas en las zonas aledañas del Parque Izta-Popo, los parámetros analizados cumplen con los intervalos establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas para aguas naturales, sin embargo se registraron 10 excepciones, en donde se requiere tratamiento antes del vertimiento a los cauces, principalmente de las zonas bajas.
- Los sistemas dentro del Parque Nacional presentan una calidad de agua aceptable, mientras que en las zonas cercanas esta se ve deteriorada también por las actividades agrícolas que se realizan en los alrededores.

## LITERATURA CITADA

- American Society for Testing and Materials (ASTM). *Manual de aguas*. Tercera edición. Limusa. México. 452 p.
- Andrade A., E. 1997. *Contribución al estudio de la calidad del agua del Río Papaloapan*. Tesis licenciatura. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 73 p.
- Aparicio M., F. J. 1994. *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa, Grupo Noriega Editores. México. 303 p.
- APHA-AWWA-WPCF. 1992. *Métodos Normalizados. Para el análisis de aguas potables y residuales*. 17a. edición. Ediciones Díaz de Santos. España.
- Armijo B., G. 1982. *Evaluación de la calidad del agua en el Río Nautla mediante índices de calidad*. Tesis licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 125p.
- Arredondo F., J. L. y J. T. Ponce P. 1998. *Calidad del agua en acuicultura*. AGT Editor. México. 222 p.
- Arrignon, J. 1984. *Ecología y piscicultura de aguas dulces*. Segunda edición. Mundi-Prensa. España. 390 p.
- Artemyev, V. E. 1996. *Geochemistry of organic matter in river-sea systems*. Klumer Academic Publishers. Netherlands. 190 p.
- Baird, C. 2001. *Química ambiental*. Reverté. España. 622 p.
- Barcenás P., V. 1975. *Metodología para el estudio de la calidad del agua de un río*. Tesis licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 132 p.
- Castro J., M. 2000. *Análisis fisicoquímico y bacteriológico de la calidad del agua Ramal Tlahuac 1991-1992*. Tesis licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 88p.
- Chávez C., J. M. y N. Trigo B. (coordinadores). 1996. *Programa de Manejo para el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl*. Colección "Ecología y Planeación". Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. México. 273 p.
- Demers, M. N. 2000. *Fundamentals of Geographic information Systems*. Segunda edición. John Wiley & Sons, Inc. U.S.A. 450 p.
- Fassbenber, H. W. y E. Bornemisza. 1987. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. IICA. Costa Rica. 420 p.
- García, E. 1973. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 243 p.
- García B., E. 1989. *Materia orgánica en los sedimentos de la plataforma sureste del Golfo de California. Relaciones ecológicas y granulométricas*. Tesis licenciatura. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 60 p.
- Gómez O., D. 1999. *Evaluación del impacto ambiental*. Mundi-Prensa, Agrícola Española. España. 701 p.
- Gordon, N. D.; T. A. McMahon and B. L. Finlayson. 1992. *Stream hydrology: An introduction for ecologists*. John Wiley & sons. Great Britain. 526 p.

- Gray, N. F. 1994. *Calidad del agua potable*. Acirbia. España. 365 p.
- Gross, M. G. 1971. *Carbon determination*. In: *Procedures in sedimentary petrology*. Carver, R. E. (Ed). University of Georgia, Athen. U.S.A.
- Hammer, M. J. 1996. *Water and Waste-Water Technology*. SI Version. John Wiley & Sons. Singapore. 504 p.
- Hernández G., M. G. y E. Rivera B. 1996. *Evaluación de la calidad del agua del río "La Compañía", en el transecto del municipio de Tlalmanalco a Ciudad Netzahualcoyotl, Estado de México (Marzo 1994 - Febrero 1995)*. Tesis licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 109 p.
- Hugh, W. D.; S. M. Hill y W. D. Gardner. 1985. *Bacterial growth and the decomposition of the particulate organic carbon collected in sediment traps*. *Cont. Shelf. Res.* 4 (4): 445-464.
- INE-SEMARNAP. 1995. *Áreas Naturales Protegidas: Economía e instituciones*. Gaceta Ecológica. INE-SEMARNAP. Diciembre, N°37. 17 P.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1981. *Síntesis Geográfica del Estado de Morelos*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. 132 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1995. Carta topográfica de Huejotzingo. México, Morelos, Puebla y Tlaxcala. Escala 1:50 000. E14B42.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1996. Carta topográfica de Amecameca. Estado de México. Escala 1:50 000. E14B41.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1998. Carta topográfica de Atlixco. Puebla y Morelos. Escala 1:50 000. E14B52.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1998. Carta topográfica de Cuautla. Morelos, Estado de México y Puebla. Escala 1:50 000. E14B51.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1998. Carta topográfica de Izúcar de Matamoros. Puebla. Escala 1:50 000. E14B62.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1999. Carta topográfica de Tepalcingo de Hidalgo. Morelos y Puebla. Escala 1:50 000. E14B61.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. Carta hidrológica digitalizada. E14-B31. Escala 1:50 000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. Carta hidrológica digitalizada. E14-B32. Escala 1:50 000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. Carta hidrológica digitalizada. E14-B41. Escala 1:50 000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. Carta hidrológica digitalizada. E14-B42. Escala 1:50 000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. Carta hidrológica digitalizada. E14-B51. Escala 1:50 000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. Carta hidrológica digitalizada. E14-B52. Escala 1:50 000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. *Síntesis Geográfica del Estado de Puebla*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. 124 p.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2001. *Síntesis de Información Geográfica del Estado de México*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. 139 p.
- Jiménez C., B. E. 2002. *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. Limusa - Grupo Noriega Editores, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A. C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA. México. 926 p. ilustr.
- Lapeña, M. R. 1999. *Tratamiento de aguas industriales. Aguas de proceso y residuales*. Alfaomega. México. 175 p.
- Lind, O. T. 1985. *Handbook of common methods in limnology*. Second edition. Kendall, Hunt Publishing Company. U.S.A. 199 p.
- Lugo H., J. 1984. *Geomorfología del Sur de la Cuenca de México*. Instituto de Geografía. Tomo 1. Núm. 8. Serie Varia. México. 120 p.
- Manahan, S. E. 2001. *Fundamentals of Environmental Chemistry*. Second edition. Lewis Publishers. U.S.A. 1003 p.
- Margalef, R. 1983. *Limnología*. Ediciones Omega. España. 954 p.
- Margalef, R. 1995. *Ecología*. Ediciones Omega. España. 951 p.
- Martínez C., L. R. (compilador). 1998. *Ecología de los sistemas acuícolas*. AGT Editor. México. 227 p.
- Mason, C. F. 1991. *Biology of freshwater pollution*. Second edition. Longman Scientific & Technical. Hong Kong. 351 p.
- Metcalf y Eddy, INC. 1981. *Wastewater Engineering. Treatment, disposal and reuse*. Third edition. McGraw-Hill. U.S.A. 1334 p.
- Mitchell, M. K. and W. B. Stap. 1995. *Field Manual for Water Quality Monitoring. An Environmental Education Program for Schools*. 9ª Ed. Thomson-Shore, Inc. U. S. A. 272 p.
- Navarro, M. del C. y G. Legorreta. 1998. *Sistemas de información geográfica, teoría introductoria y ejercicios con Autocard e Idrisi*. Publicaciones Docentes del Museo de Zoología "Alfonso L. Herrera". UNAM. México. 136 p.
- Nemerow, N. L. 1995. *Stream, lake, estuary, and ocean pollution*. Second edition. Environmental engineering. Series Vanrostran Reinhold. New York. 243 p.
- Ordoñez D., M. de J. y O. Flores V. 1995. *Áreas Naturales Protegidas*. Pronatura. México. 32 p.
- Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli. 1984. *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press. Great Britain. 173 p.
- Payne, A. I. 1986. *The ecology of tropical lakes and rivers*. John Wiley & Sons. Great Britain. 301 p.
- Raiswell, R. W.; P. Brimblecombe; D. L. Dent y P. S. Liss. 1983. *Química ambiental*. Omega. España. 209 p.
- Ramos M., S. 2001. *Análisis de calidad del agua y biomasa del fitoplancton de la presa Emiliano Zapata, Morelos, México*. Tesis licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 78 p.
- Reyes J., I. 1996. *Fundamentos teórico-prácticos de temas selectos de la ciencia del suelo*. Parte I. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. México. 257 p.

- Ricklets R., E. 1998. *Invitación a la ecología*. Cuarta edición. Editorial Médica Panamericana. Argentina. 692 p.
- Rodier, J. 1990. *Análisis de las aguas*. Omega. España. 1059 p.
- Rodríguez T., F. 1975. *Elementos de escurrimiento superficial*. Departamento de irrigación. Escuela Nacional de Agricultura, Universidad Autónoma Chapingo. México. 221 p.
- Rojas S., A. V. 2001. *Evaluación del riesgo e impacto ecológico por el efecto de los flujos piroclásticos en el volcán Popocatepetl*. Proyecto S. S. para título de biólogo. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. México. 75 p.
- Romero R., J. A. 1999. *Calidad del agua*. Segunda edición. Alfaomega. México. 270 p.
- SARH. 1992. *Compendio de información sobre áreas naturales protegidas*. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. Dirección General de Fauna y Flora Silvestre y Áreas Naturales Protegidas. México. 196 p.
- Sawyer, C. N.; P. L. McCarty y G. E. Parkins. . *Química para ingeniería ambiental*. Cuarta edición. McGraw-Hill. Colombia. 713 p.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecológico (SEDUE). 1986. *Parque Nacional Izta-Popo*. Subsecretaría de Ecología. Dirección General de Conservación Ecológica de los Recursos Naturales. México. 23 p.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Norma Oficial Mexicana. NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997.
- Snoeyink, V. L. y D. Jenkins. . *Química del agua*. Limusa. México. 493 p.
- Stoker, S. H. y S. L. Seager. . *Química ambiental. Contaminación del aire y del agua*. Blume. España. 320 p.
- Tebbutt, T. H. Y. 1995. *Fundamentos de control de calidad del agua*. Limusa. Noriega Editores. México. 232 p.
- Torres O., R. y J. L. García C. 1995. *Introducción al manejo de datos limnológicos*. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. México. 130 p.
- Vargas M., F. 1997. *Parques Nacionales de México. Aspectos físicos, sociales, legales, administrativos, recreativos, biológicos, culturales, situación actual y propuestas entorno a los parques nacionales de México*. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México. 254 p.
- Westman, E. W. 1984. *Ecology impact assessment and environmental planning*. John-Wiley & Sons. U.S.A. 532 p.
- Wetzel, R. G. 2001. *Limnology. Lake and river ecosystems*. Third edition. Academic Press. U. S. A. 1006 p.
- Wetzel, R. G. y G. E. Likens. 1991. *Limnological analyses*. Second edition. Springer-Verlag. U.S.A. 391 p.
- Whitlach, R. B. y R. G. Johnson. 1974. *Methods for staining matter in marine sediments*. Jour. Sed. Pet. 44 (4): 1310-1312.
- Winkler, M. A. 1986. *Tratamiento biológico de aguas de desecho*. Limusa. México. 338 p.

## ANEXO

**Cuadro 1.** Para determinar el grado de alcalinidad de las aguas superficiales según Nisbet y Verneaux (1970) citados en Arrignon (1984).

<i>Alcalinidad total</i> $T = \text{mg/l } \text{HCO}_3^-$	<i>Grado de alcalinidad</i>
$T < 25$	Alcalinidad excesivamente débil. Aguas muy poco productivas.
$25 < T < 50$	Alcalinidad muy poco acusada. Aguas dulces muy poco productivas.
$50 < T < 100$	Alcalinidad poco acusada. Alcalinidad media. Aguas muy productivas.
$100 < T < 150$	Zonas superiores de cursos de agua que recorren regiones calizas. Alcalinidad media. Aguas muy productivas.
$150 < T < 250$	Zonas media e inferior de cursos de agua que recorren regiones calizas.
$250 < T < 350$	Alcalinidad intensa.
$T > 350$	Alcalinidad muy intensa.

**Cuadro 2.** Para determinar el grado de dureza de las aguas superficiales, tomada de Gray (1994) y Romero (1999).

<i>Concentración (mg/l)</i>	<i>Grado de dureza</i>
0 - 75	blanda
75 - 150	moderadamente dura
150 - 300	dura
> 300	muy dura

Cuadro 3. Para la interpretación del contenido de materia orgánica en muestras de suelo según Moreno (1970, citado en Reyes, 1996).

<i>% de materia orgánica</i>	<i>Interpretación</i>
< 0.62	Extremadamente pobre
0.60 – 1.20	pobre
1.21 – 1.80	Medianamente pobre
1.81 – 2.40	mediano
2.41 – 3.00	Medianamente rico
3.01 – 4.20	Rico
> 4.20	Extremadamente rico

Cuadro 4. Para determinar la velocidad de la corriente según Berg, citado por Arrignon (1984).

<i>Muy lentas</i>	Inferior a 0.1 m/s
<i>Lentas</i>	De 0.1 a 0.25 m/s
<i>Medias</i>	De 0.25 a 0.5 m/s
<i>Rápidas</i>	De 0.5 a 1 m/s
<i>Muy rápidas</i>	Superiores a 1 m/s

Cuadro 5. Para determinar la dinámica de cauces (Gómez, 1999).

<i>Cauce</i>	<i>Caudal</i>
<i>Permanentes</i>	Mayor a 150 m <sup>3</sup> /s
<i>Permanentes</i>	De 5 a 150 m <sup>3</sup> /s
<i>Temporales</i>	Menor a 5 m <sup>3</sup> /s
<i>Ocasionales</i>	Menor a 1 m <sup>3</sup> /s

Tabla 2. Análisis multivariable de los parámetros físicos, químicos e hidrológicos de las cinco subcuencas.

ALTITUD	ORDEN	T_AMB	T_AGUA	pH	CONDUC	O_D	ALC_TOT	DUR_TOT	D_Ca	SULFURO	SULFATOS	M_O_SED	C_O_P	VEL	AFORO
ORDEN															
T_AMB	0,4212 0,0000														
T_AGUA	<b>0,5246</b> <b>0,0000</b>	<b>0,7593</b> <b>0,0000</b>													
pH	0,2588 0,0132	0,3152 0,0023	0,2878 0,0057												
CONDUC	0,4290 0,0000	<b>0,5089</b> <b>0,0000</b>	0,4400 0,0000	0,3890 0,0001											
O_D	-0,1983 0,0595	-0,3741 0,0003	<b>-0,6609</b> <b>0,0000</b>	-0,2896 0,0054	-0,3192 0,0020										
ALC_TOT	0,3350 0,0012	0,4770 0,0000	<b>0,6475</b> <b>0,0000</b>	0,3631 0,0004	<b>0,7129</b> <b>0,0000</b>	<b>-0,6064</b> <b>0,0000</b>									
DUR_TOT	0,2232 0,0334	0,4492 0,0000	0,4925 0,0000	0,1766 0,0940	<b>0,6778</b> <b>0,0000</b>	-0,2829 0,0066	<b>0,7755</b> <b>0,0000</b>								
D_Ca	0,1557 0,1404	0,3794 0,0002	0,3466 0,0008	0,2315 0,0272	<b>0,5830</b> <b>0,0000</b>	-0,2853 0,0061	<b>0,6958</b> <b>0,0000</b>	<b>0,8141</b> <b>0,0000</b>							
SULFURO	0,0133 0,9005	-0,1974 0,0607	-0,1388 0,1895	-0,3401 0,0010	-0,0346 0,7448	0,2555 0,0145	-0,1218 0,2501	-0,0293 0,7829	-0,1293 0,2220						
SULFATOS	0,4131 0,0000	0,4650 0,0000	<b>0,5392</b> <b>0,0000</b>	0,1303 0,2184	<b>0,6657</b> <b>0,0000</b>	-0,2155 0,0402	<b>0,6161</b> <b>0,0000</b>	<b>0,7930</b> <b>0,0000</b>	0,4417 0,0000	0,0667 0,5301					
M_O_SED	-0,0737 0,4877	-0,1234 0,2438	-0,1444 0,1721	-0,0911 0,3905	0,0532 0,6165	0,1525 0,1491	0,0146 0,8909	0,0295 0,7812	0,0736 0,4880	0,1422 0,1787	-0,0367 0,7295				
C_O_P	0,0242 0,8199	-0,0927 0,3819	-0,0577 0,5866	-0,0178 0,8671	-0,1388 0,1895	0,0830 0,4343	-0,0388 0,7147	-0,1010 0,3410	-0,0398 0,7078	-0,1102 0,2985	-0,0335 0,7526	0,1116 0,2921			
VEL	0,3713 0,0003	0,4004 0,0001	0,3402 0,0010	0,0666 0,5306	0,2300 0,0283	-0,0374 0,7249	0,2225 0,0340	0,2295 0,0287	0,1856 0,0781	0,0329 0,7565	0,3946 0,0001	-0,2195 0,0366	0,0650 0,5407		
AFORO	<b>0,5181</b> <b>0,0000</b>	0,3937 0,0001	0,3649 0,0004	0,0970 0,3602	0,4275 0,0000	-0,0743 0,4842	0,2801 0,0072	0,3800 0,0002	0,2235 0,0332	0,0584 0,5821	<b>0,5956</b> <b>0,0000</b>	-0,0412 0,6985	0,0550 0,6049	<b>0,5714</b> <b>0,0000</b>	-0,3859 0,0002
ALTITUD	-0,4667 0,0000	<b>-0,7104</b> <b>0,0000</b>	<b>-0,6581</b> <b>0,0000</b>	-0,4173 0,0000	-0,4549 0,0000	0,3416 0,0009	<b>-0,5126</b> <b>0,0000</b>	-0,4762 0,0000	-0,4373 0,0000	0,2464 0,0186	-0,4411 0,0000	0,1719 0,1032	0,0212 0,8416	-0,4360 0,0000	-0,3859 0,0002