



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGO

PRESENTA

Alejandro Soledad Pérez

COMPORTAMIENTO NUTRIMENTAL DEL SISTEMA
AGUA-SUELO EN LA ZONA OCCIDENTAL DEL PARQUE
NACIONAL IZTA-POPO

Directora de tesis:

M. en C. Eloísa Adriana Guerra Hernández

México, DF





UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

“ZARAGOZA”

DIRECCIÓN

**JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE.**

Comunico a usted que el alumno **SOLEDAD PÉREZ ALEJANDRO**, con número de cuenta **302273733**, de la carrera de Biología se le ha fijado el día **30** del mes de **abril** de 2013 a las **10:00 hrs.** para presentar examen profesional, el cual tendrá lugar en esta Facultad con el siguiente jurado:

PRESIDENTE M. en C. RAMIRO RÍOS GÓMEZ.

VOCAL M. en C. ELOÍSA ADRIANA GUERRA HERNÁNDEZ

SECRETARIO BIÓL. ANGÉLICA ELAINE GONZÁLEZ SCHAFF

SUPLENTE BIÓL. LUIS SAMUEL CAMPOS LINCE

SUPLENTE DR. GERARDO CRUZ FLORES

[Handwritten signatures of the jury members]

El título de la tesis que presenta es: **COMPORTAMIENTO NUTRIMENTAL DEL SISTEMA AGUA-SUELO EN LA ZONA OCCIDENTAL DEL PARQUE NACIONAL IZTA-POPO.**

Opción de titulación: tesis.

Agradeceré por anticipado su aceptación y hago propia la ocasión para saludarle.

ATENTAMENTE
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”
México, D. F., ~~de 23 de marzo~~ de 2013.

Dr. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NÚÑEZ
DIRECTOR
ZARAGOZA
DIRECCION



[Handwritten signature of Carlos Castillejos Cruz]

RECIBI
OFICINA DE EXÁMENES
PROFESIONALES Y DE GRADO

VO. BO.
Dr. CARLOS CASTILLEJOS CRUZ
JEFE DE CARRERA

DEDICATORIAS

A mis padres, Nicolás y María del Refugio por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, su fortaleza, por ser las personas que más admiro y respeto. Gracias por su comprensión y su tiempo. Siempre estaré agradecido.

A mis hermanos, en especial a Daniel por ser la persona que me motiva a seguir adelante. Al igual que mis padres, tú me has dado el mayor ejemplo de vida...

*A Sara, por confiar y creer en mí. Gracias por compartir tu vida con mígo. **TE AMO...***

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza quien me dio la oportunidad de realizarme como profesionista.

Gracias a mi directora de tesis, M. en C. Eloísa Adriana Guerra Hernández quien con sus conocimientos y apoyo pude realizar esta tesis.

A cada uno de mis sinodales: Dr. Gerardo Cruz Flores, Biól. Luis Samuel Campos Lince, Biól. Angélica Elaine González Schaff y M. en C. Ramiro Ríos Gómez quienes con su tiempo y consejos aportaron ideas y conocimientos para la culminación de esta tesis.

ÍNDICE

TÍTULO	PÁGINA
ÍNDICE	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE CUADROS	
INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO	3
CUENCA HIDROGRÁFICA	3
DEGRADACIÓN DEL SUELO	4
EUTROFIZACIÓN	5
BOSQUES DE RIBERA	7
NUTRIMENTOS (N Y P)	7
ANTECEDENTES	12
ÁREA DE ESTUDIO	14
HIDROLOGÍA	15
CLIMA	15
GEOLOGÍA	15
VEGETACIÓN	16
FAUNA	16
JUSTIFICACIÓN	17
OBJETIVOS	17
OBJETIVO GENERAL	17
OBJETIVOS PARTICULARES	17
HIPÓTESIS	18
MÉTODOS	18
TRABAJO DE CAMPO	21
TOMA DE MUESTRAS DE SUELO	21
TOMA DE MUESTRAS DE AGUA	22
TRABAJO DE LABORATORIO	24
PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS	25
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	27
ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	67
ANÁLISIS DE CORRELACIONES CANÓNICAS	71
CONCLUSIONES	75
LITERATURA CITADA	76

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	TÍTULO	PÁGINA
1.	Ubicación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.	14
2.	Mapa del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl y zonas aledañas, sitios de muestreo.	19
3.	Esquema de muestreo en suelo y agua.	21
4.	Toma de muestras de agua.	22
5.	Toma de muestras y fijación de oxígeno disuelto.	23
6.	Medición de temperatura, conductividad eléctrica y perfil batimétrico.	23
7.	Comportamiento de la temperatura a través del gradiente altitudinal.	30
8.	Comportamiento del pH a través del gradiente altitudinal.	31
9.	Comportamiento de la conductividad eléctrica a través del gradiente altitudinal.	31
10.	Relación entre CE y durezas a través del gradiente altitudinal.	34
11.	Relación entre temperatura y pH del agua a través del gradiente altitudinal.	35
12.	Relación entre temperatura del agua y OD a través del gradiente altitudinal.	36
13.	Comportamiento del nitrógeno (agua y suelo) a través del gradiente altitudinal.	38
14.	Relación entre nitratos, amonio del agua y espacio poroso del suelo a través del gradiente altitudinal.	40
15.	Relación entre densidad aparente y espacio poroso a través del gradiente altitudinal.	41
16.	Relación entre pH, nitratos y amonio a través del gradiente altitudinal	44
17.	Relación entre temperatura del suelo, nitratos y amonio del agua a través del gradiente altitudinal.	45
18.	Relación entre conductividad eléctrica del suelo, nitratos y amonio del agua a través del gradiente altitudinal.	47
19.	Relación entre CE en agua, nitratos y amonio a través del gradiente altitudinal.	48
20.	Relación entre nitratos, amonio y dureza del agua a través del gradiente altitudinal.	49
21.	Relación entre materia orgánica y nitrógeno total del suelo	

a través del gradiente altitudinal.	50
22. Relación entre materia orgánica y pH del suelo a través del gradiente altitudinal.	51
23. Relación entre materia orgánica y conductividad eléctrica del suelo a través del gradiente altitudinal.	52
24. Relación entre conductividad eléctrica del suelo y nitrógeno total a través del gradiente altitudinal.	54
25. Relación entre porcentaje de caudal hidrológico y nitrógeno total del suelo a través del gradiente altitudinal.	54
26. Relación entre porcentaje de humedad y nitrógeno total del suelo a través del gradiente altitudinal.	55
27. Comportamiento del fósforo a través del gradiente altitudinal.	57
28. Relación entre fósforo extractable y materia orgánica del suelo a través del gradiente altitudinal.	57
29. Comportamiento de fósforo en agua a través del gradiente altitudinal.	59
30. Relación entre fósforo total, dureza a través del gradiente altitudinal.	60
31. Relación entre fósforo total y conductividad eléctrica a través del gradiente altitudinal.	60
32. Relación entre fósforo total y alcalinidad a través del gradiente altitudinal.	61
33. Relación entre fósforo total y temperatura del suelo a través del gradiente altitudinal.	62
34. Relación entre fósforo total y pH rea y potencial a través del gradiente altitudinal.	62
35. Relación entre fósforo total y temperatura del suelo a través del gradiente altitudinal.	63
36. Relación entre oxígeno disuelto y velocidad de la corriente a través del gradiente altitudinal.	63
37. Relación entre oxígeno disuelto y DBO ₅ a través del gradiente altitudinal.	64
38. Comportamiento de la DQO a través del gradiente altitudinal.	64
39. Gráfica peso de los componentes 1 y 2.	69
40. Gráfica peso de los componentes 3 y 4.	70
41. Gráfica peso de los componentes 5 y 6.	71
42. Grafica de variables canónicas.	72

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	TÍTULO	PÁGINA
1.	Ubicación y descripción geográfica de sitios de estudio.	27
2.	Propiedades físicas y químicas de suelos ribereños.	28
3.	Parámetros físicos y químicos del agua (sistemas lóticos).	29
4.	Tipos de estructura del suelo.	42
5.	Análisis de componentes principales.	67
6.	Contribución de los componentes principales a la definición de las variables robustas.	68
7.	Correlaciones canónicas entre las propiedades de agua y suelo.	71
8.	Coeficientes de variables canónicas del primer conjunto.	72
9.	Coeficientes de variables canónicas del segundo conjunto.	72

RESUMEN

La destrucción de los recursos del bosque, trae como consecuencia el deterioro y la pérdida de la zona ribereña, alterando los suelos, la captación y distribución del agua. El nitrógeno (N) y el fósforo (P) constituyen los dos elementos más importantes para la productividad en los ecosistemas. Son los iones que en un momento determinado pueden ser los elementos más limitantes en la producción primaria. Con el objetivo de evaluar el comportamiento nutrimental del sistema agua suelo de la zona occidental del Parque Nacional Izta-Popo, se realizó un análisis físico y químico en 20 puntos de muestreo con corrientes superficiales permanentes y con diferente uso de suelo a través del gradiente altitudinal. Entre los parámetros más importantes para suelo se determinó la temperatura, densidad aparente, espacio poroso, porcentaje de humedad, textura, pH real, pH potencial, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno total y fósforo extractable. Para el análisis físico y químico del agua se determinó temperatura, velocidad de la corriente, caudal, nitratos, amonio, pH, ortofosfatos, fósforo total, dureza de calcio, dureza total, alcalinidad, oxígeno disuelto, DBO₅, DQO y sólidos totales disueltos.

Con el objetivo de conocer la relación que existe entre las variables se realizó un análisis de correlación múltiple. A partir del análisis se seleccionaron las variables que presentaron correlación significativa y se graficaron en función a la altitud. Una vez realizado el análisis de correlación múltiple se seleccionaron las variables con coeficiente de correlación más alto y se realizó un análisis de componentes principales el cual aportó 6 componentes que explican 79.42% de la variabilidad de los datos originales y muestra la relación entre ambos sistemas. Finalmente se realizó un análisis de correlaciones canónicas seleccionando las variables de mayor peso estadístico en el análisis de componentes principales. Se obtuvieron 3 coeficientes con valor-P menores que 0.05, esos conjuntos tienen una correlación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0 %. Con base a los análisis estadísticos se determinó que existe correlación significativa entre el aumento de la correlación de nitratos, amonio, fósforo total en agua y la degradación del suelo.

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) y el fósforo (P) constituyen los dos elementos más importantes para la productividad primaria en los ecosistemas. Su concentración varía desde microgramos (μgL^{-1}) en medios oligotróficos, hasta varios miligramos por litro en medios eutrofizados. Son los iones que en un momento determinado pueden ser los elementos más limitantes en la producción primaria. En cuanto al origen del nitrógeno, tiene como fuente principal la atmósfera y la descomposición de la materia orgánica. El fósforo, por su parte, proviene de la disolución de las rocas fosfatadas, este también regresa al medio a través de la mineralización de la materia orgánica. Por lo tanto, el nitrógeno es un elemento mucho más abundante en el agua y de una disponibilidad más inmediata (Roldán y Ramírez 2008).

Los arroyos y ríos corresponden a uno de los tipos de ecosistemas más afectados por actividades humanas tales como la regulación del caudal, el cambio de uso de suelo, la introducción de especies exóticas, así como diferentes tipos de contaminación (Kutschker *et al.*, 2009). Entre las más graves están las que generan la eutrofización, la cual comienza con un aumento de la cantidad de nutrientes que recibe un sistema en forma de iones nutritivos esenciales que necesitan los organismos fotosintéticos para su desarrollo. Por tanto, la eutrofización como aumento de N y P incrementa la productividad del sistema y produce un desequilibrio en el reciclado de los estos elementos que desencadena diversos procesos de autoalimentación que hacen perdurar estas condiciones incluso después de reducirse su aporte al sistema. El enriquecimiento de los ecosistemas acuáticos en nutrientes originados por la actividad humana se conoce como eutrofización antrópica y puede producirse por aportes en forma disuelta generalmente de fosfato y compuestos inorgánicos de nitrógeno derivados del uso excesivo de fertilizantes en suelos agrícolas ó a través de sustancias particuladas como materia orgánica y coloides provenientes de vertidos urbanos y agropecuarios (Serrano *et al.*, 2006). Lo anteriormente expuesto motiva al estudio de las propiedades físicas y químicas de arroyos y ríos, y su variación en función de las de los suelos aledaños en un enfoque integral de cuencas hidrográficas.

Las cuencas hidrográficas están definidas por el relieve terrestre donde los sistemas hídricos que la conforman están conectados de forma que dan origen a una red que tiene influencia dentro y fuera de su entorno. Además del agua, el clima, la vegetación y el suelo dentro de una cuenca están ligados entre sí y constituyen combinaciones únicas de características físicas que dan como resultado el ambiente; asimismo cada combinación es capaz de asimilar y transferir materia y energía. Definir los procesos de transferencia de agua y suelo a través de la cuenca y sus eventuales puntos de recepción, es el primer paso para determinar la

capacidad de los sistemas, así como los impactos y dependencias que sufren (Galván y Márquez, 2006). A nivel global, las cuencas hidrográficas están siendo sometidas a una fuerte presión antrópica que se traduce en una continua degradación de los recursos naturales mediante la contaminación de cuerpos de agua, la pérdida de biodiversidad, la disminución en la productividad de la tierra y la vulnerabilidad ante desastres naturales (Ortiz *et al.*, 2005).

La problemática ambiental que se genera en el Parque Nacional Izta-Popo, radica en su configuración territorial actual, la cual se caracteriza por tener una dinámica en desequilibrio, a pesar de que la región ha proporcionado una gran cantidad de bienes ecosistémicos que han favorecido el desarrollo de zonas urbanas cercanas. A cambio, la zona ha recibido marginación, extracción de una gran cantidad de recursos y la modificación en uso del suelo, disparadas por el aprovechamiento no sustentable. La destrucción de los recursos del bosque, trae como consecuencia el deterioro y la pérdida de la zona ribereña con alteración de los suelos, la captación y distribución del agua. Este daño está repercutiendo cada vez más sobre la calidad de vida de los habitantes más cercanos a los volcanes y también de las grandes ciudades que dependen de este recurso natural (Contreras, 2005). El conocimiento sobre el estado actual de los corredores ribereños es un elemento clave para la integración de un plan de restauración; los corredores de vegetación que se dejan crecer a ambos lados del cauce contribuyen notablemente a disminuir el impacto negativo y constituyen una estrategia para disminuir el impacto de la ganadería, deforestación y la agricultura sobre los ambientes acuáticos, pues contribuyen a tener mejor calidad de agua, mayor integridad del cauce, mejor hábitat físico y consecuentemente una biota más diversa dentro de las quebradas (Chara *et al.*, 2007).

MARCO TEÓRICO

CUENCA HIDROGRÁFICA

Una cuenca hidrográfica es un área de la superficie terrestre alimentada por un único sistema fluvial, el patrón y densidad de las corrientes que la drenan no sólo dependen de la estructura geológica sino también del relieve, el clima, el tipo de suelo y la vegetación (Rivas *et al.*, 2009). Los bosques influyen decisivamente en la disponibilidad y calidad del agua, por consiguiente dependen de una ordenación forestal apropiada (Ezcurra *et al.*, 2006). La captación del agua en los bosques contribuyen de manera significativa a su conservación minimizando la erosión del suelo (Carder *et al.*, 2007). Las cuencas son unidades morfológicas integrales que abarcan toda una estructura hidrogeológica delimitada topográficamente, las montañas en sus partes más altas determinan el escurrimiento de agua de lluvia, nieve o deshielo hacia una ladera o hacia otra formando ríos, arroyos, lagos y lagunas. Debido a que las cuencas tienen límites físicos naturales muy claros, se considera que son la unidad más funcional para administrar el agua. Sin embargo, uno de los problemas principales para su manejo es que en la mayoría de los casos no coinciden los límites naturales con las fronteras sociopolíticas, es decir, ciudades, estados o provincias y países comparten muchas veces una misma cuenca. Manejar los recursos hídricos mediante las cuencas, favorece la conservación de la naturaleza y por ende su buen funcionamiento. Una cuenca sin ecosistemas naturales o muy degradados tiende a ser una proveedora pobre de calidad y cantidad de agua (FEA, 2006).

El flujo de agua y nutrientes a través de los bosques es considerado esencial para su manutención y equilibrio, no hay duda de que los mayores cambios tienen como causa las actividades antrópicas como los cambios de uso de suelo, las actividades agrícolas y ganaderas, deforestación, pastoreo y tala inmoderada, que se traducen habitualmente en una alteración en las concentraciones de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo en los cauces de agua. El transporte de compuestos nitrogenados y fosfatados de alta concentración es típico para cauces de agua que drenan áreas con agricultura intensiva, debido al uso extensivo de fertilizantes (Arauzo *et al.*, 2006).

El ciclo del agua se puede alterar de manera directa, mediante su extracción y posterior vertido ya contaminada o bien indirectamente, alterando la vegetación y la cobertura del suelo. Ambas formas de impacto alteran el régimen de circulación y calidad de las aguas. La remoción de la vegetación habitualmente provoca un incremento en las tasas de sedimentación y sólidos en suspensión, nitrógeno y fósforo total en el escurrimiento superficial, particularmente en las áreas intensivamente cultivadas o dedicadas al pastoreo (Miracle, 2006).

DEGRADACIÓN DEL SUELO.

Uno de los principales procesos de degradación del suelo es la erosión, mismo que presenta el arrastre y la pérdida definitiva del suelo por acción directa de algún agente de transporte: el agua (erosión hídrica) o el viento (erosión eólica). Si este proceso ocurre sin la intervención del hombre, se denomina erosión natural o geomórfica. Si por el contrario el hombre, a través de inadecuadas prácticas del manejo del suelo, propicia o favorece el proceso de erosión, se dice que la erosión del suelo es antrópica y en la mayoría de los casos acelerada. En un ecosistema natural cuando se alcanza el clímax ecológico, existe un equilibrio entre el suministro de nutrimentos a través de la meteorización de las rocas y las pérdidas causadas por la lixiviación o por procesos naturales de erosión del suelo. En el suelo de un bosque natural, una parte de ellos es extraído por la vegetación y retorna al suelo a través de la hojarasca y de las raíces muertas, que aportan una cantidad importante de materia orgánica, que al descomponerse los libera para que sean nuevamente utilizados, creándose de esta manera un ciclo cerrado suelo-planta-suelo. Por otro lado la vegetación, en particular las raíces de las plantas, al liberar anhídrido carbónico (CO_2) y diversos ácidos orgánicos, contribuyen a acelerar la meteorización de las rocas, creándose a través de nuevos procesos la formación del suelo. En los bosques naturales los diversos estratos vegetales (arbóreo, arbustivo, y herbáceo) brindan al suelo una cobertura máxima. Ello determina que los procesos de lixiviación vertical y de erosión sean muy atenuados e incluso nulos, favoreciendo la acumulación de nutrimentos (Hudson, 2006).

La agricultura en su lado negativo ha contribuido a la degradación del suelo de diversas maneras, la pérdida de la fertilidad, la salinización, la contaminación por agroquímicos, la erosión debida a la eliminación de la cobertura vegetal por el sobrepastoreo, la compactación del suelo por maquinaria agrícola, la reducción del contenido de materia orgánica y el movimiento constante degradan al suelo. Todos estos tipos de degradación causan que la capacidad productiva del suelo disminuya reduciéndose también el rendimiento agrícola. Bajo estas condiciones el productor debe emplear más fertilizantes para mantener los mismos rendimientos, lo cual afecta la estructura y composición del suelo. Se estima que las plantas sólo utilizan de 25 a 85 % del nitrógeno aplicado, esto provoca que muchas veces la aplicación de fertilizantes sea inadecuada o excesiva dando como resultado un arrastre de ellos con el agua o lixiviación. El uso de fertilizantes con nitrato soluble, se traduce directamente en el incremento de nitrato (N-NO_3^-) en mantos freáticos lo cual tiene implicaciones negativas en la salud humana y calidad ambiental. Hasta hace poco el problema de contaminación de mantos freáticos por nitrato (N-NO_3^-) fue considerado sólo un problema de las áreas rurales, pero hoy en día tiene un impacto también en las zonas urbanas (Vázquez, 2009).

Para comprender en que situación se encuentra un suelo, es importante determinar parámetros físicos y químicos que indiquen el grado de erosión o perturbación generado por la expansión humana, agrícola o la destrucción misma del bosque. Entre las propiedades más importantes a considerar, se encuentran la textura del suelo, la fracción mineral del suelo constituida por partículas de diferentes tamaños, arena (200 - 20 micras), limo (20 - 2 micras) y arcillas (menos de 2 micras); la proporción de cada uno de los componentes varía de un suelo a otro y depende directamente del material de origen. La textura afecta el número y

tamaño de los poros y por tanto el espacio poroso de cada suelo, la humedad, aireación y consecuentemente la actividad de los microorganismos en el suelo están en función de la textura (Hernández, 2005). El pH es una propiedad química importante de un suelo como medio destinado al cultivo vegetal y por tanto, igualmente importante para los microorganismos presentes en él. El contenido de materia orgánica es factor fundamental por su influencia sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo tales como: color, estructura, capacidad de retención de agua, disponibilidad de nitrógeno, fósforo y azufre; la fracción orgánica del suelo consta de residuos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición e incluye todos los microorganismos del suelo, no es uniforme en su constitución y continuamente ocurren cambios en ella (Hernández, 2005). La conductividad eléctrica es la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica, es una propiedad que se encuentra muy relacionada con el tipo y valencia de los iones presentes, sus concentraciones total y relativa, su movilidad, la temperatura del líquido y el contenido de sólidos disueltos, su determinación es por tanto una forma directa de medir la salinidad del suelo. La densidad aparente (DA) es la relación de masa de suelo seco por unidad de volumen total, en g/cc, el volumen total incluye tanto el volumen ocupado por los sólidos y el espacio poroso, los cambios en DA son resultado de la diferencia de textura, grado de compactación, estructura y porcentaje de materia orgánica (Castillo, 2007).

EUTROFIZACIÓN

El proceso de eutrofización de los cuerpos de agua es una consecuencia de los flujos relativamente altos de estos nutrimentos. Numerosos parámetros edáficos condicionan el comportamiento hidrológico de la cuenca, los más destacables son la profundidad del suelo, textura, estructura y porosidad, a través de los cuales se controla la capacidad de infiltración y retención de agua. El suelo constituye un regulador de la escorrentía superficial y subterránea. La erosión del suelo no solo afecta su productividad sino que también propicia problemas adicionales como el transporte de nutrimentos (Manson, 2004). La eutrofización o envejecimiento de un cuerpo de agua pueden ser de tipo natural, que generalmente señala el paso gradual de una etapa oligotrófica a otra de tipo eutrófica en la que la concentración de nutrimentos se incrementa considerablemente, o bien artificial en la que los aportes se originan como consecuencia de actividades humanas (Rodríguez, 1994).

El enriquecimiento de compuestos derivados del nitrógeno y fósforo de las aguas produce un crecimiento excesivo de las algas, las cuales al morir se depositan en el fondo de los ríos o lagos generando residuos orgánicos que al descomponerse, consumen gran parte del oxígeno disuelto y de esta manera puede afectar a la vida acuática y producir la muerte por asfixia de fauna y flora hasta el punto de matar el río o lago por completo. Los nutrimentos que más influyen en este proceso son los fosfatos y los nitratos; mismos que son de naturaleza muy diversa. Las aguas residuales domésticas contienen nitrógeno y fósforo procedente de los desechos humanos y los productos de limpieza, mientras que algunas industrias también producen vertidos más o menos ricos en estas sustancias así mismo la actividad agraria es una fuente importante por los abonos suministrados a los cultivos y los desechos originados por la ganadería (Mynor, 2010).

La contaminación y mal uso agravan la situación del agua en México, donde el 73% de toda el agua del país incluyendo el 95% de los ríos está contaminada y requiere de un tratamiento avanzado antes de poder consumirla. Sin embargo, en el 2009 sólo el 19.3% de las aguas residuales reciben un tratamiento adecuado (Manson, 2004).

A pesar de la gran variedad de servicios hidrológicos proporcionados por los bosques y selvas de México aunado al problema general del agua en el país la situación de estos ecosistemas es precaria. La deforestación en México alcanza un promedio de 176906 ha/año (2009) lo cual es una de las tasas más altas en América Latina, [publicación en línea] disponible en <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.PDF> [fecha de acceso, 13 noviembre 2012]

Los arroyos y ríos corresponden a uno de los tipos de ecosistemas más afectados por las actividades humanas. Entre las principales causas de estas alteraciones se encuentran la regulación del caudal, la introducción de especies exóticas y el cambio de uso de suelo aledaño (Kutschker, 2009). Los ríos de montaña están influenciados principalmente por la precipitación, las variables físicas, químicas y biológicas responden a este patrón condicionado por el clima local, los nutrientes están fuertemente controlados por las variaciones en el caudal que permite almacenarlos o explotarlos aguas abajo. Los incrementos del caudal regulan el procesamiento de materia en el río por el transporte del material alóctono y la deriva de especies. Para determinar el estado verdadero en que se encuentran los cuerpos de agua es necesario evaluar y analizar sus características físicas y químicas y su interacción con el ecosistema esto implica el manejo de diversos parámetros (Hernández, 1996).

Existen dos métodos importantes para medir la calidad del agua de un río en cuanto al contenido de materia orgánica presente en el mismo, la Demanda Bioquímica de Oxígeno en cinco días (DBO₅) que es una medida de la cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitan para oxidar la materia orgánica presente en la muestra de agua y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) que es la cantidad de oxígeno consumida para oxidar completamente la materia orgánica por medios de agentes químicos. Los valores de DQO se relacionan con los de DBO₅ en proporciones que varían de acuerdo a los componentes asociados a la materia orgánica en degradación. Esta relación es de gran importancia para determinar el tipo de contaminación de las aguas y la biodegradabilidad de materia contaminante (Hidalgo, 2003). Las fuentes de agua están siendo seriamente contaminadas por las actividades humanas, se vierten diariamente sedimentos, descargas agrícolas y químicos tóxicos que alteran su equilibrio. Los análisis más comunes para determinar la calidad del agua se refieren a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Oxígeno Disuelto (OD) (Guevara, 2001).

El pH afecta la diversidad y distribución de los organismos y determinan la naturaleza de muchas reacciones químicas que ocurren en el ambiente acuático, la medida del pH es una de las pruebas más importantes y frecuentes utilizadas en el análisis químico del agua, prácticamente todas las fases de tratamiento del agua para suministro y residual, como la neutralización ácido-base, suavizado, coagulación, desinfección, precipitación y el control de

la corrosión dependen del pH. Gases disueltos como el dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y amonio afectan principalmente los valores del pH (Wetzel, 2001).

Otra propiedad física importante es la conductividad, que representa la capacidad de conducción de la corriente eléctrica en función de la cantidad de sólidos y sales electrolizables disueltos, de forma que cuanto mayor sea el contenido de sólidos mayor será la movilidad, valencia y concentraciones relativas, estado de oxidación de los mismos, la temperatura y la movilidad de los iones. El contenido de sales aumenta cuando los terrenos en contacto con el agua están cargados con ellas (Miranda, 2004).

BOSQUES DE RIBERA

Los bosques de ribera juegan un papel ecológico importante, retienen parte del nitrógeno y fósforo transportados por la escorrentía desde los cultivos hasta los cursos de agua (Chara *et al.*, 2007). Una banda de vegetación de ribera de 16 m de largo retiene 50 % de nitrógeno y 95 % de fósforo, además de esta retención las bandas de vegetación de ribera dan sombra al agua y reducen su temperatura, estabilizan las orillas, minimizan los riesgos de erosión y ofrecen un hábitat a muchas especies animales y vegetales (Granados *et al.*, 2006). Con frecuencia son excepcionalmente fértiles y productivos, generalmente demuestran ser ricas en nutrimentos y así propician el desarrollo de plantas mediante el movimiento del oxígeno a través del suelo. La vegetación ribereña se considera la base de la cadena alimentaria de los cuerpos de agua, puesto que el material orgánico proveniente del mantillo (hojas, ramas caídas en descomposición) transportado hacia el cuerpo de agua, a partir de la vegetación marginal, constituye un suministro energético más importante para la producción autóctona en los ríos (Granados *et al.*, 2006). Las zonas de ribera pueden capturar, absorber y almacenar cantidades de lluvia hasta 40 veces superiores a la de otros suelos, tales como campos de cultivo y zonas urbanas y hasta 15 veces más que pastizales (Álvarez y Oria de Rueda, 1999). A pesar de su importancia, el mantenimiento de la biodiversidad regional de la zona ribereña en México ha sido relativamente poco estudiada, estas comunidades han sido consideradas como un sistema continuo que distribuye materiales a través del paisaje y en él se presenta una gran variedad de interrelaciones terrestres y acuáticas (Camacho *et al.*, 2006).

NUTRIMENTOS (N y P)

Es conocida la influencia del caudal sobre la concentración de iones en solución del agua de arroyos y ríos. En el caso del nitrógeno, este se acumula en periodos de caudales relativamente bajos como consecuencia de la acumulación de material alóctono por la baja velocidad de la corriente. Por otra parte, el fósforo tiende a presentar una alta concentración en el periodo de mayor caudal y velocidad de la corriente (Donato, 2008). En el flujo energético de los ecosistemas es importante ver la variación de los nutrimentos en diferentes formas, responsables en primera instancia de la productividad primaria acuática. La concentración de los nutrimentos ofrece información insustituible, ya que estos factores, al controlar al proceso de producción primaria, también lo hacen con el resto de la rama

trófica. Los fenómenos más comunes asociados a los nutrimentos son: su carencia o su exceso, ambos con severas consecuencias para la biota acuática, la escasez de nutrimentos está asociada a sistemas oligotróficos con una mínima producción primaria. En otro extremo se encuentran los sistemas hipereutróficos en donde la generación continua y masiva de biomasa, principalmente fitoplanctónica genera serios problemas en los flujos energéticos (Leal, 2005).

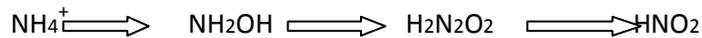
El nitrógeno puede ser utilizado por las plantas en forma de catión, amonio (N-NH_4^+) o en forma de anión nitratos (N-NO_3^-), es el elemento fundamental en el crecimiento de las plantas, constituyente de las proteínas de los vegetales, la clorofila, los ácido nucleicos. Un suministro adecuado de nitrógeno produce paredes celulares más delgadas originando plantas más delicadas y suculentas, la mayor fuente de este elemento tiene su origen en la materia orgánica del suelo, ya que su descomposición libera nitrógeno como ion amonio. Esta liberación de nitrógeno de la materia orgánica es la fuente más importante de este nutrimento utilizable en campos no fertilizados. Aunque la materia orgánica del suelo contiene aproximadamente 5 % de su peso como nitrógeno, solamente 2 a 5 % del total es liberado anualmente por descomposición, misma que se realiza más rápidamente en suelos cálidos, bien aireados y húmedos (Donahue y Miller, 1981).

El nitrógeno de las aguas dulces se presenta bajo diversas formas N_2 disuelto, gran número de compuestos orgánicos desde aminoácidos y aminas hasta proteínas y compuestos húmicos resistentes, amonio N-NH_4^+ , nitrito N-NO_2^- y nitrato N-NO_3^- . El origen del nitrógeno puede ser: precipitación, fijación de nitrógeno tanto del agua como de los sedimentos y aportes debidos al drenaje superficial o subterráneo (Wetzel, 2001).

Los microorganismos juegan un papel importante en el ciclo del nitrógeno, alrededor de 90 % del nitrógeno total en los suelos está en forma orgánica no disponible y puede ser transformado a formas disponibles mediante la actividad microbiana a ion amonio por el proceso de amonificación, el cual se ve influenciado por la temperatura, aireación y pH del suelo o por hidrolisis enzimática de la ureasa del suelo. El siguiente paso de la reacción del nitrógeno es la nitrificación, que es un proceso de oxidación microbiana del ion amonio a nitrito. Esto ocurre rápidamente bajo condiciones aireadas con una temperatura de 15 a 30 °C y un pH de 6.5 a 7.5. De las numerosas reacciones de oxidación y reducción, la nitrificación inicial por bacterias, hongos y organismos se puede expresar como:



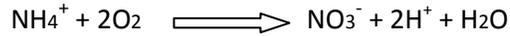
Esta ecuación se desarrolla a través de una serie de estados de oxidación pasando por hidroxilaminas y oxima pirúvica hasta ácido nitroso



Los productos intermedios son altamente lábiles a la oxidación física y se encuentran raramente en cantidad significativa si los comparamos con otras formas de nitrógeno combinado, las bacterias nitrificantes capaces de oxidar el NH_4^+ a NO_2^- son principalmente del género *Nitrosomonas*. Estas bacterias son mesófilas tolerando amplios límites de temperatura (1 a 37 °C) y muestran un crecimiento óptimo a un pH próximo a la neutralidad, posteriormente, el nitrito se oxida a nitrato.



Nitrobacter es el género principal de bacterias implicado en esta oxidación y es menos tolerante a las bajas temperaturas y pH elevado. El total de reacciones de nitrificación requiere dos moles de oxígeno para la oxidación de uno de NH_4^+



En los suelos, el movimiento de los nitratos es dependiente de la cantidad de agua que esta infiltrando el suelo, el contenido de humedad, de la precipitación, porosidad y permeabilidad. Durante los periodos lluviosos aumenta el percolado de nitratos. Así también estos pueden ser reducidos a nitrógeno gaseoso por microorganismos mediante el proceso llamado desnitrificación el cual consiste en la reducción bioquímica de los aniones de nitrógeno oxidados N-NO_3^- y N-NO_2^- para la oxidación de la materia orgánica (Wetzel, 2001).

En ocasiones frecuentes las plantas no pueden utilizar completamente el nitrógeno disponible en el suelo, el exceso de fertilizante nitrogenado añadido aumenta substancialmente el arrastre de nitrógeno por aguas pluviales. Otra fuente importante son las excretas de animales, que contienen grandes cantidades de compuestos nitrogenados susceptibles a convertirse en nitritos y posteriormente en nitratos, el riego de zonas extensas de tierra de cultivo, fertilizadas con desechos de animales, contamina las aguas freáticas, especialmente cuando el nivel de nitrógeno y fósforo es mayor del que necesitan los cultivos. Los nitratos en las aguas superficiales se derivan de la descomposición natural de materiales nitrogenados orgánicos así como de las proteínas de las plantas y animales (Oyarzun y Campos, 1997). Los abonos químicos son generalmente la causa principal de la contaminación de las aguas superficiales pero los nitratos pueden venir particularmente de las aguas industriales, residuales, ganaderas así como del lavado de los suelos enriquecidos con abonos nitrogenados.

En el ciclo del fósforo, este pasa con rapidez a través de las redes alimenticias. Mientras se desplaza de la tierra a los sedimentos del océano, luego regresa lentamente a tierra firme. El

fósforo en las formaciones rocosas se encuentra sobre todo en forma de fosfatos (PO_4^{3-}). El intemperismo y la erosión libran estos iones hasta corrientes y ríos, que los desplazan hacia el mar. El fósforo se acumula con el tiempo y forma depósitos insolubles en las plataformas continentales sumergidas. Después de millones de años, los movimientos de la corteza terrestre pueden levantar parte del suelo marino y exponer los fosfatos en la superficie terrestre. Ahí, el desgaste por el intemperismo y la erosión libera los fosfatos de las rocas expuestas e inicia el ciclo de nuevo. Los fosfatos se utilizan en la formación de moléculas ATP, de fosfolípidos, de ácidos nucleicos y de otros compuestos. Las plantas aprovechan el fosfato disuelto en el agua y el suelo, los herbívoros lo obtienen cuando comen plantas, los carnívoros a su vez, al comerse a los herbívoros. Los animales pierden fosfato en la orina y las heces. Las bacterias y los hongos descomponedores lo liberan de los desperdicios y los restos orgánicos, entonces las plantas lo aprovechan. El ciclo hidrológico ayuda a mover el fósforo a través del ecosistema, conforme regresa al océano transporta fosfatos disueltos que requieren los productores primarios para su crecimiento. De todos los nutrientes el fósforo es el factor más limitante en los ecosistemas (Starr *et al.*, 2008).

El fósforo es doblemente crítico porque el suministro total de la materia de los suelos es bajo y no está realmente disponible, la fuente original del fósforo en el suelo es la apatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$], un fosfato cálcico de baja solubilidad. Los iones solubilizados (H_2PO_4^-) reaccionan rápidamente en el suelo para formar fosfatos insolubles, proceso llamado fijación de fosfatos (Russell y Russell, 1968).

El fósforo como ortofosfato desempeña un papel fundamental en un gran número de reacciones enzimáticas, es esencial para la división de las células y para el desarrollo de los tejidos meristemáticos. Cierta cantidad de hierro, aluminio y magnesio solubles suelen hallarse en suelos minerales fuertemente ácidos. En tales condiciones no tarda en ocurrir una reacción con los iones fosfato haciendo que el fósforo se vuelva insoluble y no disponible para el consumo por la mayoría de las plantas (Pritchett, 1991).

Los fosfatos forman parte de los aniones fácilmente fijados por el suelo, su presencia en las aguas naturales se debe a escorrentía sobre en los terrenos y a la descomposición de la materia orgánica. Su presencia puede tener por origen una infiltración procedente de pozos negros o de depósitos de estiércol. Las aguas superficiales o de acuíferos pueden contaminarse por los vertidos industriales o por el lavado de las tierras de cultivo que contienen los abonos fosfatados o tratados con ciertos pesticidas (Morales y Chávez, 2010). El contenido de fósforo en la lluvia es inferior a la de nitrógeno. La mayor parte del fósforo de la precipitación procede del polvo que se desprende de la tierra debido a la erosión del suelo. La cantidad que entra a formar parte del drenaje superficial dependen del fósforo de los suelos, de la cobertura vegetal, de la intensidad y duración del flujo del uso de la tierra y la

polución (Rivas *et al.*, 2009). Las aguas superficiales de escorrentía reciben gran cantidad de fósforo procedente de las aguas residuales domésticas, desde luego la concentración depende de la densidad de población, los detergentes constituyen una de las principales fuentes. El fósforo juega un papel importante en el desarrollo de las algas, favorece su multiplicación y contribuye a la eutrofización, fenómeno evolutivo en el cual el medio se enriquece de nutrimentos en un modo excesivo. Los elementos responsables en este enriquecimiento son especialmente el fósforo y el nitrógeno ya que son considerados los principales nutrimentos en el desarrollo de los ecosistemas acuáticos (Morales y Chávez, 2010).

ANTECEDENTES

A partir de la década de los 90's en el siglo pasado se inició un proceso de intensificación de la agricultura y ganadería junto con la expansión de cultivo de granos en el mundo. Los cambios de uso de suelo y la tecnología agrícola provocan en consecuencia la desaparición de los balances de nutrimentos aumentando el riesgo de contaminación, el remplazo de la vegetación ribereña por cultivos, el uso de fertilizantes, la deforestación y la erosión del suelo son factores que generan un impacto directo en la estructura y funcionamiento de los arroyos provocando el desequilibrio de los mismos. Feijoó (2007) llevó a cabo un estudio ecológico sobre la importancia de la zona ribereña y el equilibrio que brinda al ecosistema al no ser perturbada.

Vigiak *et al.*, (2007), examinaron la zona ribereña para comparar los flujos de agua y sedimentos a través de estaciones con diferentes usos de suelo. Los resultados y conclusiones principales mencionan que la creciente presión de la población sobre la tierra está originando rápidos cambios. Las consecuencias se manifiestan en las pérdidas de fertilidad del suelo, el rendimiento de los cultivos y la erosión acelerada. En áreas de captación el estado compacto de los suelos impide la infiltración del agua, lo cual aumenta la superficie de la erosión, como los sedimentos arrastrados son transportadores de nutrimentos y de agentes contaminantes, el aumento y depósito de estos tienen un efecto negativo en la salud de las poblaciones de los valles. La fuerte dependencia de la agricultura especialmente por el uso del riego, los fertilizantes y los productos químicos combinada con suelos en gran medida arenosos, han ocasionado la intensa lixiviación de sustancias químicas en las aguas subterráneas provocando que la calidad del agua sea pésima y la degradación de los suelos sea alta (Kangarani y Shalmelky, 2007).

En México existe una severa crisis causada por el mal manejo del agua y suelo que se acentúa por las altas tasas de deforestación y la pérdida de los servicios hidrológicos proporcionados por los bosques.

Ortiz *et al.*, (2005), evaluaron el estado ecológico de los bosques ribereños y las condiciones socio-ecológicas referentes al uso y manejo de estos bosques. Esto generó información útil para el diseño de restauración de la cobertura vegetal de los márgenes del río y como contribución al programa de gestión integral de la cuenca baja del río Ayuquila que es uno de los 15 ríos más importantes de los 100 existentes en vertiente del Pacífico y se encuentra entre los 43 ríos más importantes a escala nacional por su diversidad, escurrimiento y población afectada. Los recursos naturales de la cuenca baja del río Ayuquila están en continuo proceso de transformación por actividades agropecuarias, industriales y urbanas,

en donde las descargas de las aguas residuales de las ciudades de Autlán y El Grullo es una de las principales causas de degradación del río.

En el municipio de Tizayuca, Estado de Hidalgo fue evaluada la calidad del agua extraída de pozos en terrenos agrícolas que fueron abonados con estiércol de bovinos durante varios años, se encontró que los fertilizantes, el estiércol y los pesticidas aplicados en el suelo han contribuido por muchos años a la contaminación de agua subterránea. Se determinó que los pozos que se encuentran en campos agrícolas abonados presentan mayores concentraciones de nitrógeno como nitratos, amonio y fosfatos (Marmolejo *et al.*, 2006).

Flores *et al.*, 2009 realizaron un estudio sobre la cuenca hidrográfica El Jihuite en Tepatitlán Jalisco, donde se identificó un problema de eutrofización en el agua por el arrastre de nutrimentos (nitrógeno y fósforo) generado por los cultivos de maíz y procesos agropecuarios. Se observó que la pérdida de nutrimentos en el suelo estaba asociada con el proceso de escurrimiento superficial.

Se realizó una investigación general sobre las propiedades físicas y químicas del agua de efluentes permanentes y del suelo adyacente en bosques de ribera en el Parque Nacional Izta-Popo, en un gradiente altitudinal entre 2679 y 3858 msnm. El análisis estadístico de correlaciones entre parámetros del agua y las propiedades del suelo, la descripción de la variación de las propiedades en función de la altitud y de los tipos de vegetación cercanos a cada unidad ambiental. Se observó una tendencia de que conforme aumenta la altitud los contenidos de materia orgánica en suelo y N-total se incrementan, mientras que el pH activo y potencial, disminuye ligeramente. La temperatura es un factor importante en la dinámica de la interacción y determina en este caso la solubilidad de las especies químicas presentes como el oxígeno disuelto, el calcio, magnesio, nitratos, nitritos y fósforo. Finalmente se observó que el suelo mejor conservado presenta mayor cantidad de sólidos suspendidos y de ortofosfatos, así como menor cantidad de carbonatos y bicarbonatos asociados al calcio y al magnesio. Se concluyó que existen diversas variables del suelo como el pH y la altitud que tienen una alta correlación con diferentes propiedades del agua (Cruz *et al.*, 2009).

Ayala (2011), realizó un proyecto de investigación ecológica en 18 sitios ribereños de corrientes superficiales permanentes, con diferentes usos de suelo en la región occidental del Parque Nacional Izta-Popo. Con la finalidad de evaluar la relación entre los sistemas agua, suelo y vegetación, se analizaron parámetros físicos y químicos además de las variables hidrológicas. Mediante el análisis de correlación múltiple se hizo el análisis de componentes principales en donde se determinó la influencia del medio terrestre en el agua, la calidad del suelo en función a la altitud y su relación con la velocidad de la corriente, la estructura del suelo y su grado de conservación.

ÁREA DE ESTUDIO

El Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, fue creado en 1935 con el fin de proteger las montañas que conforman la Sierra Nevada, en el centro oriental del Eje Volcánico Transversal y declarado por la UNESCO como La Reserva de la Biosfera los Volcanes en 2010 se caracteriza por poseer integridad ecológica funcional significativa y riqueza en sus ecosistemas comparativamente mayor que en el resto del país y en el caso particular, es un área de influencia donde sus boscosas montañas captan y filtran agua que abastecen dos cuencas importantes la del Balsas y la del valle de México y brindan innumerables servicios ambientales, alta biodiversidad y diferentes tipos de ecosistemas, endemismos, etc. Se ubica en la parte central del Eje Volcánico Transmexicano, se localiza entre las coordenadas geográficas $18^{\circ} 59'$ y $19^{\circ} 25'54''$ de latitud norte y $98^{\circ}38'58''$ y $98^{\circ}52'58''$ de longitud oeste. Localizado en los límites de los estados de México, Puebla y Morelos, cuenta con una superficie de 54,097 ha.

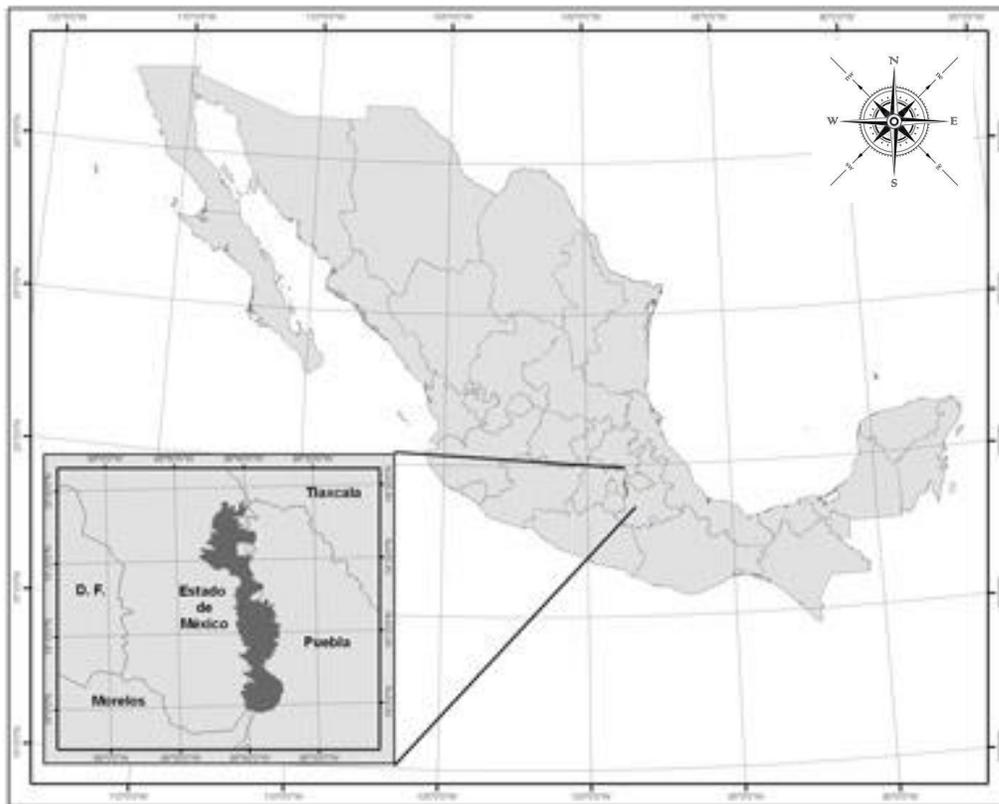


Figura 1. Ubicación del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl. Disponible en línea, imagen tomada CONANP <http://iztapopo.conanp.gob.mx/hubicacion.php>

HIDROLOGÍA

Los recursos hídricos que nacen en el Parque Nacional Izta-Popo son originados principalmente por el deshielo de los glaciares y la precipitación pluvial, abundante en la región por arriba de los mil milímetros anuales. Los ecosistemas de este parque nacional efectúan los procesos que permiten la recarga de acuíferos y mantos freáticos que abastecen buena parte de la zona metropolitana de la ciudad de México y del valle de Puebla y Tlaxcala.

El parteaguas de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl divide las aguas del océano Atlántico (Golfo de México) de las del Pacífico y conforman 2 de las cuencas más importantes y varias subcuencas que abastecen comunidades y municipios. Hacia la parte occidental descienden gran parte de arroyos que van a desembocar al Norte de la Sierra Nevada los cuales a través del gran canal del desagüe son tributarios del río Tula y a su vez éste, del Pánuco que desemboca en el Golfo de México (Matria, 2007).

Todos estos escurrimientos superficiales en la región de los volcanes conforman las trayectorias fluviales, subcuencas y cuencas hidrológicas que permiten la vida y la actividad económica en un gran número de asentamientos desde el México central hasta las desembocaduras, razón por la cual la protección y conservación de los ecosistemas del Parque Nacional Iztaccíhuatl -Popocatepetl son considerados como seguridad nacional.

CLIMA

El clima de la zona de estudio es C(w2) (w) big, un clima templado semifrío subhúmedo con lluvias en verano, definiéndose como el más húmedo de los templados semifríos, la temperatura media anual es de 10.4 °C, el mes más frío es diciembre con 7.9 °C y el más cálido es abril con 11.9 °C con una precipitación total anual de 1074 mm. El mes más seco es febrero con 10.3 mm y el más húmedo es el mes de julio con 196.5 mm, el porcentaje de lluvia invernal es de 3.6 % (Rodríguez, 2004).

GEOLOGÍA

La geología regional esta representada por rocas volcánicas del cenozoico, principalmente del terciario aunque se encuentran de manera aislada afloramientos de rocas mesozoicas del cretácico tardío. La evolución tectónica de la Sierra Nevada generó un conjunto de estructuras que manifiestan una zona de arqueamiento de la corteza terrestre. Debido a que son generadas por el vulcanismo mas antiguo, las rocas andesíticas y dacíticas de la parte norte del área de Zoquiapan son las más expuestas a los agentes meteóricos (contrastes de temperatura, humedad y acción de los vientos) que actúan de manera interna y externa provocando el agrietamiento y descomposición de los componentes internos de las rocas (minerales) contribuyendo a la generación de suelos. Según la FAO 1994 los suelos presentes en los municipios aledaños a los Parques Nacionales Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y anexas se clasifican en seis grandes grupos: leptosoles, regosoles, andisoles o andosoles, cambisoles, phaeozems y fluvisoles. Por otro lado el intenso tectonismo y magnetismo de la

zona ha causado fracturamiento en las rocas, lo que favorece la infiltración del agua de lluvia en la zona montañosa y de esta manera alimenta los cuerpos de agua.

VEGETACIÓN

Los pastizales alpinos los encontramos por arriba de los 4000 m snm sin embargo, encontramos los pastizales subalpinos desde los 2700 m hasta alturas mayores, bosques de oyamel desde los 2700 a los 3500 m principalmente en cañadas u zonas húmedas, bosques de pino de diversas especies desde los 2350 hasta los 4000 m, bosques de encino y diversas combinaciones con pinos a diferentes altitudes, en la parte más baja se encuentran bosques de Táscate y su combinación con arbustos, existe una enorme variedad de hongos y plantas medicinales así como diversos pastos. En las partes bajas encontramos chaparrales y matorrales principalmente *juníperos* y *Quercus* (Contreras, 2005; SEMARNAT 2013).

FAUNA

El parque alberga un total de 377 especies de vertebrados las cuales 74 son endémicas y 57 se encuentran bajo algún criterio de protección de SEMARNAT, así mismo se registra la presencia de 12 especies de anfibios, de las cuales 10 son endémicas, como la salamandra, el ajolote y la rana arborícola. En cuanto a los reptiles se registra la presencia de 43 especies las cuales 16 de ellas son endémicas y se encuentran bajo algún criterio de conservación, existen 211 especies de aves, en donde 20 de ellas son endémicas. En el parque se encuentran 110 especies de mamíferos, de las cuales 20 son endémicas como por ejemplo: la tuza y el conejo de los volcanes. En total alberga un total de 377 especies de anfibios, reptiles, aves y mamíferos (Matria, 2007).

Se distribuyen 8 órdenes, 15 familias y 50 especies de mamíferos; tres de esas especies son endémicas: los ratones *Peromyscus maniculatus* subsp. *cineritius* (probablemente extinta en el medio silvestre) y *Peromyscus maniculatus exiguus* (que se encuentra amenazada); y el zacatuche o teporingo (*Romerolagus diazi*), que se encuentra en peligro de extinción. Otras especies amenazadas son la musaraña oscura (*Sorex vagrans*) y el tejón o tlalcoyote (*Taxidea taxus*). Los roedores son los mejor representados, incluyen tuzas, ardillas y ratones; le sigue el orden de los carnívoros, como gato montés, zorros, zorrillos, coyotes y mapaches, entre otros; los quirópteros (murciélagos) ocupan el tercer lugar; con menos especies se encuentran los insectívoros (musarañas), y finalmente los lagomorfos (conejos). Sin duda alguna, el conejo de los volcanes, zacatuche o teporingo (*Romerolagus diazi*), que por sus características óseas se considera una especie primitiva, es una de las especies más carismáticas de este parque nacional. El zacatuche, que toma ese nombre justamente por vivir entre los zacates, es una especie endémica del Eje Volcánico Transversal y se encuentra en peligro de extinción, razón por la cual se convirtió en la especie emblema de esta área natural protegida. [Publicado en línea] disponible en internet <http://iztapopo.conanp.gob.mx/mamiferos.php> [Fecha de acceso 10 noviembre 2012].

JUSTIFICACIÓN

Como resultado de la creciente transformación de suelo forestal a ganadero, agrícola o al establecimiento de asentamientos humanos, la proporción de la superficie ribereña ha disminuido, en los pueblos pequeños cerca de los volcanes Popocatepetl- Iztaccíhuatl en donde se explota el ecosistema a diversas escalas, la calidad del agua y la pérdida del suelo son problemas ambientales críticos generados por la expansión humana. A pesar de su importancia, el mantenimiento de la zona ribereña en México ha sido relativamente poco estudiada (Ortiz *et al.*, 2005) estas comunidades han sido consideradas como un sistema continuo que distribuye materiales a través del paisaje y en ellas se presenta una gran variedad de interrelaciones terrestres y acuáticas. Por múltiples y diversas fuentes de contaminación, con gran impacto en los sistemas de agua y suelo aunado a la explotación excesiva del acuífero, se ha llegado a la siguiente pregunta ¿Cuál es el estado que guardan los nutrimentos N y P en el sistema agua-suelo de sistemas ribereños? Ante ello se propuso en esta investigación estudiar la dinámica de los nutrimentos e identificar el estado en que se encuentran el sistema agua y el suelo a través del gradiente altitudinal y proponer estrategias que frenen el deterioro de la calidad o cantidad del agua y la degradación y pérdida del suelo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento nutrimental del P y N en el sistema agua-suelo de zonas ribereñas asociadas a cuerpos lóticos permanentes a lo largo del gradiente altitudinal en la región occidental del Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl.

OBJETIVOS PARTICULARES.

- Determinar las propiedades físicas y químicas del suelo en sitios con diferente altitud.
- Determinar el comportamiento físico y químico de sistemas lóticos permanentes utilizando algunas de las variables de mayor relevancia.
- Comparar el comportamiento de nitrógeno y fósforo presentes en agua y suelo a lo largo de gradiente altitudinal en ambos sistemas.
- Comparar las variables físicas y químicas del sistema agua-suelo en diferentes intervalos altitudinales, utilizando métodos de análisis estadísticos.

HIPÓTESIS

Si se realiza un estudio comparativo de las propiedades físicas y químicas del sistema agua-suelo en la zona ribereña, en función a la altitud se infiere que habrá un incremento del nitrógeno y el fósforo en agua a causa del aporte directo de desechos domésticos, abonos y uso de fertilizantes como consecuencia del cambio de uso de suelo conforme la altitud disminuye, así mismo se generará una deficiencia de nutrimentos en suelo a causa de la erosión y pérdida de materia orgánica en localidades dedicadas a la recreación, ganadería, agricultura o presencia de asentamientos humanos.

MÉTODOS

TRABAJO DE GABINETE

Se recopiló la información necesaria a través de la bibliografía, cartografía y datos electrónicos para definir las características del lugar, se seleccionaron sitios con corrientes permanentes en zonas forestales, agrícolas, ganaderas y urbanas con diferentes grados de conservación a través del gradiente altitudinal dentro y fuera del Parque Nacional Izta-Popo.

Se ubicaron y muestrearon 20 sitios: Palo rechino-1, Palo rechino-2, Apatlaco-1, Apatlaco-2, Agua Marrano, Nexcolango, Atlamaya, La venta, Tierra Amarilla, C. Tesanto, Amipulco, Alcalica, Tepepotl-1, Tepepotl-2, Cacaloo, Huehuetla, Tomacoco, Coapexco, Ayapango y Nepantla. Se obtuvo para cada uno la caracterización general. La selección *in situ* de los sitios de muestreo se llevó a cabo de acuerdo a la información proporcionada en los antecedentes, la accesibilidad y objetivos del estudio. En cada punto de muestreo se recopilaron los siguientes datos generales: uso de suelo, tipo de vegetación, hora, nubosidad, altitud, coordenadas geográficas UTM.

5100000

5200000

5300000

5400000

2130000

2120000

2110200

2100000

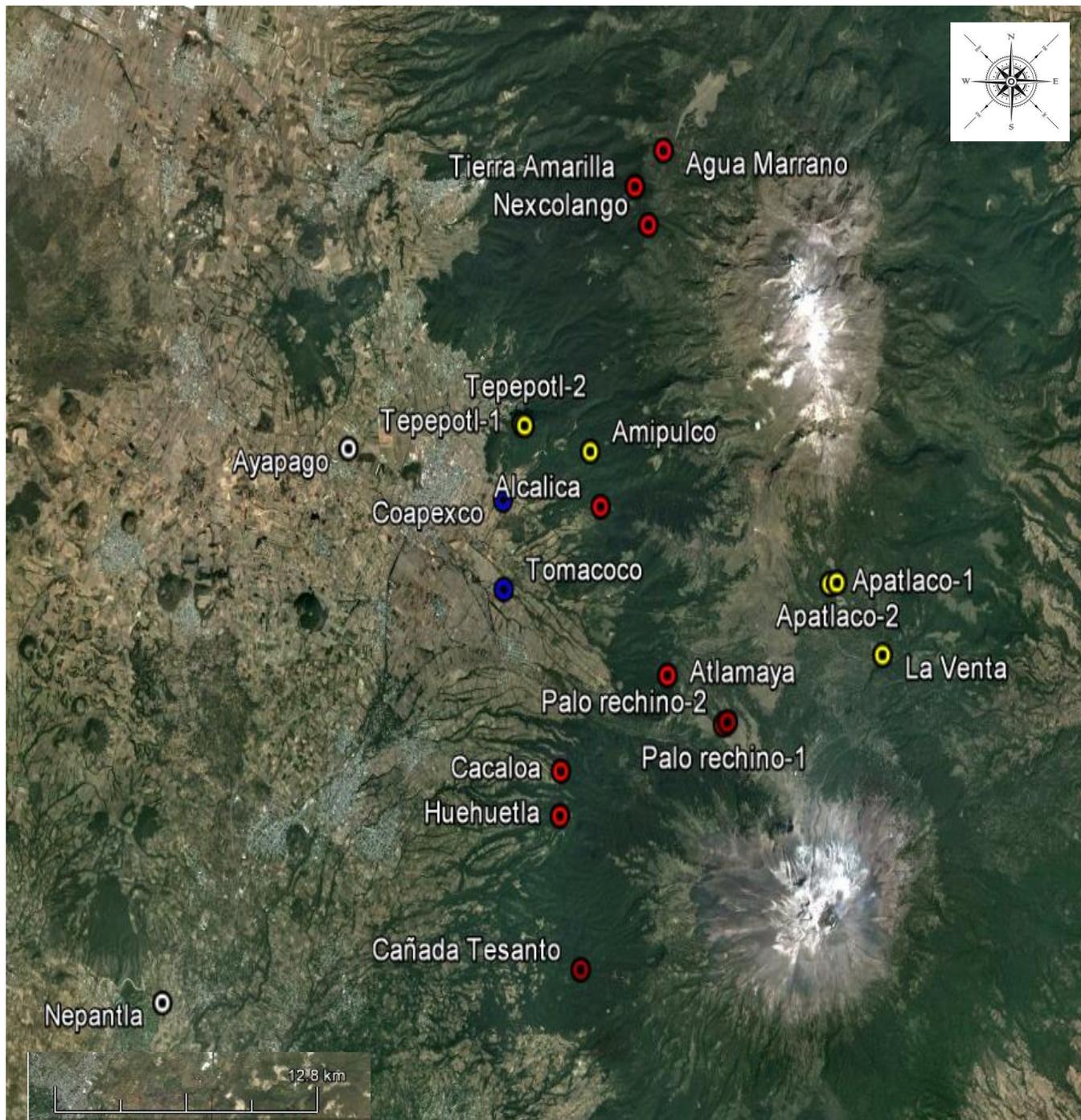


Figura 2. Mapa del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl y zonas aledañas, zonas de muestro.

● Forestal
 ● Recreativo
 ● Cultivo-agropecuario
 ● Urbano

PROCESAMIENTO DE DATOS.

A partir de los resultados, se creó una base de datos que incluía los parámetros físicos y químicos de agua y suelo, para realizar un análisis estadístico con ayuda del programa *StatGraphics Centurion XV*. Se hizo un análisis de correlación múltiple para determinar el grado de asociación entre las variables

Posteriormente se seleccionaron las variables que presentaron correlaciones significativas ($P < 0.05$) con la finalidad de realizar un análisis de componentes principales. Posteriormente se efectuó un análisis de correlaciones canónicas con las variables de mayor peso estadístico en el análisis de componentes principales y finalmente se identificaron las variables de mayor impacto.

TRABAJO DE CAMPO.

SUELO

En cada sitio se marcó un transecto de 25 m a lo largo del arroyo, con ayuda de una cinta métrica se midieron 1 y 5 m de forma perpendicular a cada lado del arroyo y en ambas distancias se tomaron muestras a 0, 12.5 y 25 m sobre el transecto figura 3.

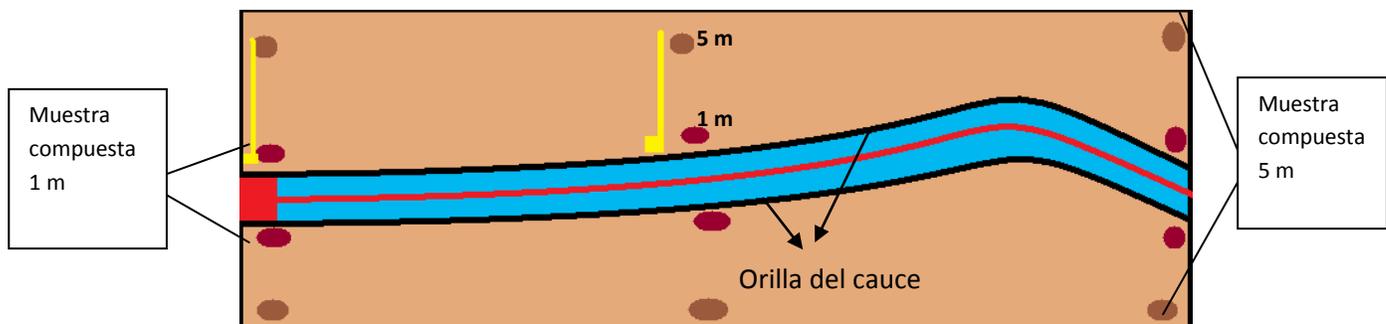


Figura 3. Esquema de muestreo en suelo y agua.

En cada uno de los puntos se trazo un cuadrante de 20 x 20 cm del cual se retiró la vegetación, hojarasca y capa de mantillo; se tomó una muestra de suelo de aproximadamente 500 g a una profundidad de 0 a 30 cm y se colocó en una bolsa de plástico con sello (ziploc), posteriormente se obtuvo una muestra compuesta con las muestras correspondientes a cada distancia y lado del cauce. Una vez mezcladas y homogenizadas se contó con dos muestras compuestas de aproximadamente 1 kg para 1 y 5 m en cada localidad.

Para determinar espacio poroso y densidad aparente se introdujo un tubo de PVC directamente en el suelo (4 cm de diámetro y 7 cm de alto) posteriormente al retirarlo se selló con plástico y ligas en los extremos. Las muestras se transportaron en una hielera para su conservación hasta el laboratorio, donde se pesaron antes de eliminar la humedad, posteriormente se secaron a temperatura constante de 35 °C durante tres días, mismos en los que fueron pesadas una vez al día, en una balanza analítica comprobando que llegaron a peso constante (Moosegar y Warrick, 1986).

AGUA

Se tomaron las muestras de agua en los recipientes correspondientes (plástico) de 1000 y 500 mL. Los recipientes limpios se enjuagaron 2 a 3 veces con el agua del sitio antes de tomar la muestra directa y manualmente. Es recomendable dejar fluir el agua para que la muestra sea representativa (Arredondo y Ponce ,1998).

La muestra de 1 L se utilizó para determinar nitratos, nitritos, amonio, Fósforo total, ortofosfatos, dureza total, dureza de calcio y alcalinidad.

La muestra de 500 mL fue conservada con 10 gotas de ácido Sulfúrico concentrado hasta un pH de 2 y se utilizó para determinar la Demanda Química de Oxígeno (Arredondo y Ponce, 1998).

Las muestras se transportaron selladas y se mantuvieron en un recipiente hermético con hielo (hielera) para su transporte al laboratorio donde se analizó lo más pronto posible.



Figura 4. Toma de muestra de agua

Adicionalmente se tomó una muestra de agua para determinar oxígeno disuelto en botellas DBO de 50 mL, enjuagadas de 2 a 3 veces con el agua del lugar y con precaución de tomarla directamente sin generar ninguna burbuja, es una de las determinaciones más importantes para la investigación de los ambientes acuáticos, ya que provee información importante acerca de las relaciones biológicas y bioquímicas que ocurren en el agua. Se fijó y se cuantificó el O₂ por el método de Winkler Azida de sodio modificada (APHA-AWWA-WPCF, 1992).

La muestra para DBO₅ se mantuvo protegida y en incubación a 20°C durante 5 días, para posteriormente cuantificar el oxígeno (APHA-AWWA-WPCF, 1992).



Figura 5. Toma de muestra y fijación de oxígeno disuelto.

In situ se realizó la medición de pH y conductividad eléctrica, con ayuda de un multiparámetro (Combo HANNA modelo HI-98129). Una de las primeras determinaciones que se deben realizar es la temperatura, ya que esta tiene un gran efecto sobre los procesos químicos y biológicos del ecosistema acuático, e influyen sobre el metabolismo y la fisiología de los organismos, la temperatura del agua se midió con un termómetro de inmersión parcial con mercurio y precisión de 0.1 °C (NMX-AA-007-SCFI-2000), el perfil batimétrico y velocidad de la corriente utilizando el método (sección velocidad).



Figura 6. Medición de temperatura, conductividad eléctrica y perfil batimétrico.

TRABAJO DE LABORATORIO

Determinación del pH: El pH de una solución es la medida de la concentración de iones hidronio o más específicamente la actividad de los iones hidronio y se representa como: $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$, en una escala del 0 a 14 un pH de 7 representa una solución neutra donde las concentraciones de H^+ y OH^- tienen el mismo valor. En un cuerpo acuático la desviación del pH del valor de 7 es resultado de bases fuertes y ácidos débiles o viceversa. Gases disueltos como el bióxido de carbono, ácido sulfhídrico y amonio también afectan los valores del pH (NMX-AA-008-SCFI-2000, APHA-AWWA-WPCF, 1992).

Determinación de la alcalinidad (Método volumétrico 2 indicadores): Este método se basa en el manejo de los pHs utilizando la fenolftaleína y el anaranjado de metilo como indicadores. Para la valoración se utiliza al ácido sulfúrico 0.02N, ya que esta concentración de 1 mL de H_2SO_4 es exactamente igual a 1 mg de CaCO_4 (APHA-AWWA-WPCF, 1992).

Determinación de dureza total (Método complejométrico): Los iones de calcio y magnesio son valorados con la sal disódica del ácido etilendiamintetracético (EDTA) para formar un complejo estable CaEDTA y MgEDTA . Si una pequeña cantidad de eriocromo negro es agregado a una muestra de agua amortigua a pH 10, se formara un complejo soluble color rojo vino con los iones de calcio y magnesio. Cuando todo el calcio y el magnesio han reaccionado el color de la solución se vuelve azul. (APHA-AWWA-WPCF, 1992).

Determinación de dureza de calcio (Método complejométrico): La murexida presenta un color púrpura oscuro que en presencia de calcio forma un complejo estable de color rojizo o rosa. Al agregar EDTA el calcio se disocia de su complejo de murexida para formar un compuesto quelato con la sal del EDTA. (APHA-AWWA-WPCF, 1992).

Determinación de nitratos (Método ácido fenoldisulfónico): Este método tiene un principio colorimétrico en el cual, el ácido fenoldisulfónico reacciona con el nitrato en ausencia de agua para formar un nitroderivado, que en medio alcalino es alterado ligeramente para producir un compuesto de color amarillo. (Manual de técnicas básicas para el análisis de ambientes acuáticos).

Determinación de amonio (Método fenato): Este método se basa en la reacción del amonio con fenol e hipoclorito en condiciones alcalinas para formar un indofenol de color azul, utilizando nitroprusiato como catalizador, el color desarrollado es proporcional a la concentración de amonio en la muestra (Manual de técnicas básicas para el análisis de ambientes acuáticos).

Determinación de fósforo total (Método digestión con persulfato): Las diferentes formas de fósforo son hidrolizadas a fosfatos por tratamiento de ácido, calentamiento y presión (NMX-AA-029-SCFI-2001, APHA-AWWA-WPCF, 1992).

Determinación de fosfatos (método del fosfomolibdato): Los ortofosfatos solubles se transforman en un complejo colorido de fosfomolibdato por reacción del molibdato de amonio en medio ácido. Presentándose una coloración azul que se incrementa en forma

proporcional a la cantidad de ortofosfatos presente en la muestra. (NMX-AA-029-SCFI-2001, APHA-AWWA-WPCF, 1992).

Determinación de DQO (método reflujo cerrado colorimétrico): La demanda química de oxígeno se define como la cantidad de un oxidante específico que reacciona con una muestra en condiciones controladas, la cantidad de oxígeno consumida por la reacción se expresa en términos de mg/L (APHA-AWWA-WPCF, 1992).

PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS DE SUELO

La preparación de la muestra incluye su recepción y registro, secado, molienda, tamizado, homogenizado pesado y almacenamiento dentro del laboratorio. Esta preparación debe ser realizada en algún lugar especial de tal manera que se evite la contaminación, tanto de la muestra como del material presente del laboratorio.

En general se recomienda que las muestras sean secadas al aire, a menos que se desee determinar su contenido de humedad. El secado de las muestras se realizó extendiendo éstas sobre una superficie no contaminante. Esta puede ser polietileno o papel, es decir, un material que permita recoger y homogeneizar la muestra posteriormente.

Antes de proceder a la molienda, deben retirarse las rocas y el material orgánico visible. Cuando estos materiales ocupan una porción considerable del suelo, es necesario evaluar su peso para posteriormente considerarlo en el cálculo de la concentración de los parámetros evaluados. Ya que todo el suelo debe pasar a través de tamices, los terrones deben ser desmenuzados. Esto se logra con un mazo o cilindro de madera. Debe evitarse moler las partículas de grava y arena. Una vez que el suelo ha sido molido, se le hace pasar por un tamiz de 2 mm (malla 10). De este material tamizado, se necesita tener aproximadamente 1 kilogramo. El homogeneizado puede lograrse utilizando bolsas de plástico (pueden ser las mismas donde estaban originalmente las muestras), haciendo girar la muestra en todas direcciones. La submuestra extraída debe ser pesada con balanza de precisión, de preferencia con aproximación del 0.1 %, con respecto a la magnitud de la pesada que se desea realizar.

Una vez que las determinaciones analíticas han sido realizadas, las muestras pueden ser almacenadas para posteriores comprobaciones u otros usos. Para esto pueden ser utilizados los frascos de vidrio o de plástico. Estos recipientes deben permanecer herméticamente cerrados y debidamente etiquetados. Para esto se recomienda conservar el número de registro de laboratorio, junto con la fineza del material. La muestra almacenada puede sufrir cambios o perder algunas características como el contenido de nitrógeno, lo cual debe tenerse presente para posteriores usos.

Determinación de textura (método Bouyoucus): El método se basa en la velocidad de sedimentación de las partículas de arena, limo y arcilla. La eliminación de la materia orgánica

se logra mediante su oxidación con H_2O_2 al 30 %, por otra parte para eliminar la acción de los cationes se requiere la adición de sales de sodio u otros agentes dispersantes. Finalmente las partículas deben ser separadas por agitación mecánica. (*IPS, 1994).

Determinación de materia orgánica (método Walkley y Black): Se basa en la reacción de la materia orgánica ante un agente oxidante, favorecida por la ayuda de calor (*IPS, 1994)

Determinación de pH (método potenciómetro): El pH del suelo corresponde al de su fase acuosa o solución salina, donde dicha fase acuosa junto con los coloides ionizables del suelo intervienen conjuntamente para determinar su pH. La disociación de los grupos ácidos ionizables de los coloides del suelo y las sales solubles, dan lugar a la liberación de iones H^+ que pasarán a la solución del suelo (*IPS, 1994)

Determinación de densidad aparente (método del cilindro): La determinación de la DA permite conocer el posible volumen que ocupa una masa de suelo. El conocimiento del volumen del suelo, permite inferir su estructura, penetrabilidad, porosidad y drenaje interno, para que su uso no altere el espacio poroso (Moosegar y Warrick, 1986).

Determinación de espacio poroso: Existe una extensa relación con el espacio poroso (EP), donde a mayor compactación menor porcentaje de EP existirá en el suelo. A menor porcentaje de EP menor retención de humedad, menor aireación y al drenaje es más lento (Moosegar y Warrick, 1986).

Determinación de nitrógeno total (método Semimicro-kjeldahl para incluir nitratos): La extracción de nitrógeno se lleva a cabo por medio de una digestión con ácido sulfúrico-salicílico concentrado y mezcla catalizadora hasta que la mezcla se aclare, posteriormente se destilará y se titulará con ácido 0.05N (*IPS, 1994).

Determinación de fósforo extractable (método Bray y Kurtz 1 modificado): El fósforo se extrae a través de una solución extractante y se lee en un espectrofotómetro (*IPS, 1994).

**(IPS, 1994) Programa de intercalibración de análisis de suelos y plantas.*

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se estudiaron 20 localidades o sitios de muestreo en el Parque Nacional Izta-Popo y zonas aledañas, determinando su altitud y ubicación geográfica en unidades UTM mediante un GPS (GARMIN etrex-vista 2000). La información se indica en el cuadro 1

Cuadro 1. Ubicación geográfica (UTM) y altitud de cada localidad.

Localidad	Altitud msnm	Ubicación UTM		Uso de suelo
		ESTE	NORTE	
Palo Rechino 1	3659	536566	2110036	Forestal ¹
Palo Rechino 2	3642	536986	2108782	Forestal ¹
Apatlaco 1	3600	539313	2112874	Recreativo ²
Apatlaco 2	3555	539313	2112874	Acuacultura ²
Agua Marrano	3522	532232	2125005	Forestal ¹
Nexcolango	3489	531957	2122821	Forestal ¹
Atlamaya	3458	534565	2109811	Forestal ¹
La Venta	3347	541481	2110923	Acuacultura ²
Tierra Amarilla III	3311	530852	2126924	Forestal ¹
Cañada Tesanto	3116	530864	2101818	Forestal ¹
Amipulco	2902	530281	2116070	Recreativo ²
Alcalica	2865	530806	2114617	Forestal ¹
Tepepotl 1	2780	528500	2116550	Recreativo ²
Tepepotl 2	2760	529123	2116586	Acuacultura ²
Cacaloa	2774	529837	2106478	Forestal ¹
Huehuetla	2616	530000	2106640	Forestal ¹
Tomacoco	2567	527360	2118180	Agropecuario ³
Coapexco	2514	526590	2114589	Agrícola ⁴
Ayapango	2433	520911	2115233	Urbano ⁵
Nepantla	1987	516761	2098365	Urbano ⁵

(1) Localidades forestales con poco acceso a la población, exhiben franjas ribereñas mejor preservadas a ambos lados del cauce. Presentan distintos tipos de vegetación entre ellas rasante, herbácea, arbustiva, arbóreas, entre otras. (2) Localidades forestales con acceso a la población, existen actividades deportivas y venta de alimentos. (3) Se presenta la agricultura y la ganadería. (4) Localidades dedicadas a la agricultura. (5) Localidades expuestas a desechos domésticos, movimiento de vehículos, contaminación, disminución de la superficie del suelo por la cercanía de viviendas, manejo inadecuado de los recursos naturales.

Se presenta un resumen general de los parámetros físicos y químicos en agua y suelo de acuerdo con los resultados obtenidos, y se indican en los cuadros 2 y 3.

Cuadro 2 . Propiedades físicas y químicas del suelo.

PROPIEDAD	UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO
Temp. Suelo	°C	4	17.3
Densidad aparente	g/cm ³	0.34	1
Humedad	%	5.1	48.1
Espacio poroso	%	61.5	86.6
Arcilla	%	0	18.7
Limo	%	2	36
Arena	%	5	94
pH real		4.3	8.2
pH potencial		4.2	6.4
Cond. eléctrica	µS	0	0.3
Materia Orgánica	%	1.01	20.72
Nitrógeno total	%	0.03	0.62
Fósforo disponible	mg kg ⁻¹	5.91	306.1

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad, y clasificación de los suelos, estudio, muestreo y análisis, para la clasificación del suelo. El pH del suelo en se encontró desde fuertemente ácido (<5) hasta medianamente alcalino (7.4 a 8.5). Se determino que el contenido de materia orgánica en suelos volcánicos según la norma es de muy bajo (<4 %) en Cacaloa y Huehuetla, hasta muy alto (>16 %) en Palo Rechino. Para fósforo extractable según el método Bray y Kurtz 1, se registraron valores bajos (< 15 mg kg⁻¹) en Atlamaya, hasta altos (>30 mg kg⁻¹) en el resto de las localidades y el nitrógeno total nos indica que los suelos muestreados van desde bajo (Palo Rechino, Cañada Tesanto, Tepepotl y Huehuetla) de 0.02 a 0.08 % a mediano 0.62 % en Nexcolango. Se encontraron texturas que van de arenosa, marga arenosa y margosa. Es importante mencionar que los intervalos anteriormente mencionados corresponden a usos de suelo y altitud diferente.

Cuadro 3. Parámetros físicos y químicos del agua.

PAÁMETRO	UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO
Caudal	m ³ s ⁻¹	0	0.36
Velocidad de la corriente	m ³ s ⁻¹	0	0.8
Nitratos	mg L ⁻¹	0.03	0.54
Nitritos	mg L ⁻¹	0	0.01
Amonio	mg L ⁻¹	0	0.89
Ortofosfatos	mg L ⁻¹	0	0.23
Fósforo total	mg L ⁻¹	0.03	6.3
Dureza de calcio	mg L ⁻¹	117.7	941.7
Dureza total	mg L ⁻¹	117.1	1334
Alcalinidad	mg L ⁻¹	12	2278
Oxígeno	mg L ⁻¹	1.2	8.6
DBO₅	mg L ⁻¹	0	8.47
DQO	mg L ⁻¹	0	1092
TSD	mg L ⁻¹	16	454
pH		5.7	8.3
CE	μS	33	909

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental “agua para uso y consumo humano”, algunos de los parámetros superaron el límite máximo permisible en cuanto a las características físicas y químicas con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas. Se determinó que la Dureza total (CaCO₃ mg L⁻¹) superó el límite en Nexcolango con 604.28, Amipulco con 1099.77, Tepopotl-1 con 855.41 Tepepotl-2 con 792.63, Cacalooa con 510.10, Ayapango con 1294.89 y Nepantla con 1334.13. Amonio N-NH₄⁺ superó los límites permisibles en las localidades urbanas Ayapango con 0.896 y Nepantla con 0.684 mg L⁻¹. Nitratos, y sólidos totales disueltos se encuentran dentro de la norma, pH se encuentra por debajo de los límites en Palo Rechino pH= 6.2, Agua marrano pH= 6.1, Nexcolango pH= 6.1 y Tierra amarilla pH= 5.7. Por otra parte la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales lo que nos permite observar que la temperatura, la demanda bioquímica de oxígeno y los niveles fósforo total, se encuentran dentro de los límites permisibles de la norma específicamente para uso de riego agrícola, uso público urbano, protección de la vida acuática y recreación en todas las localidades.

Con los resultados de los parámetros de agua y suelo se realizó un análisis de correlación múltiple utilizando el programa *StatGraphics Centurion XV* para determinar el grado de asociación entre las variables ambientales de agua y suelo: altitud, nubosidad, caudal, velocidad de la corriente, temperatura de agua, suelo y ambiente, densidad aparente, porcentaje de humedad, porcentaje de espacio poroso, porcentaje de arcilla, limo y arena, pH real y potencial, conductividad eléctrica agua y suelo, materia orgánica, nitrógeno total, fósforo extractable, nitratos, nitritos, amonio, pH agua, ortofosfatos, fósforo total, dureza de calcio, dureza total, alcalinidad, oxígeno disuelto, DBO₅, DQO y sólidos totales disueltos.

A partir del análisis se seleccionaron las variables que presentaron los coeficientes de correlación más altos con un valor ($P < 0.05$).

Se graficaron en función a la altitud las temperaturas agua, suelo y ambiente, pH del suelo y del agua y la conductividad eléctrica en ambos sistemas y se muestran en las figuras 7 a la 9.

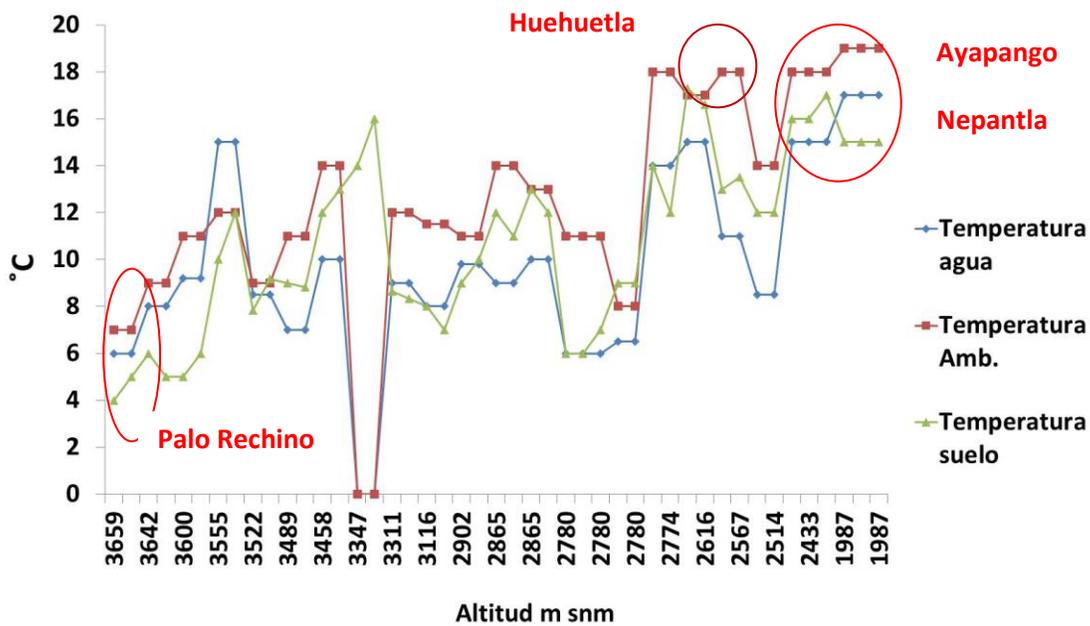


Figura 7. Comportamiento de la temperatura a través del gradiente altitudinal

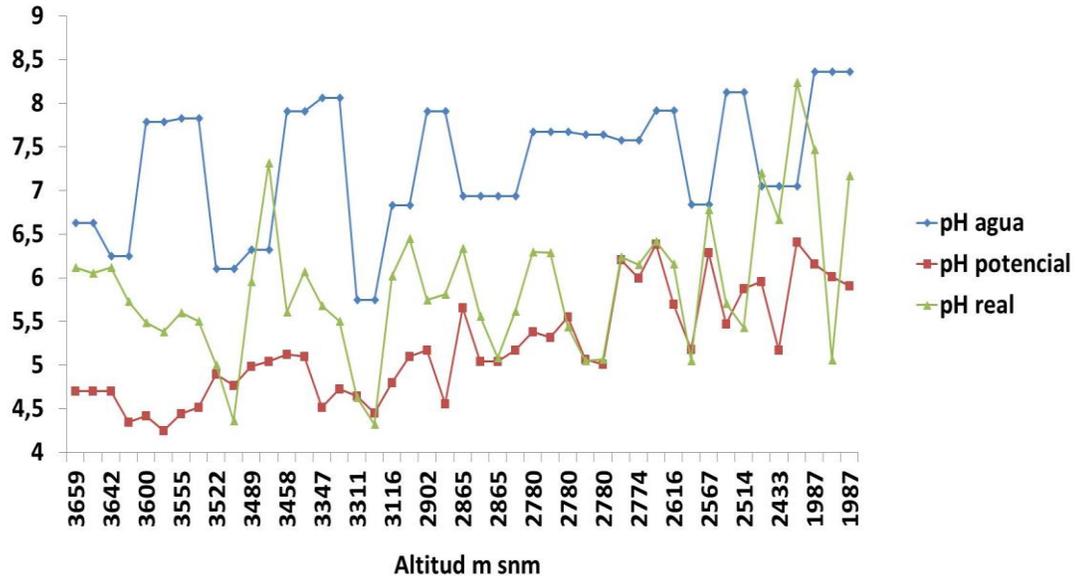


Figura 8. Comportamiento del pH a través del gradiente altitudinal

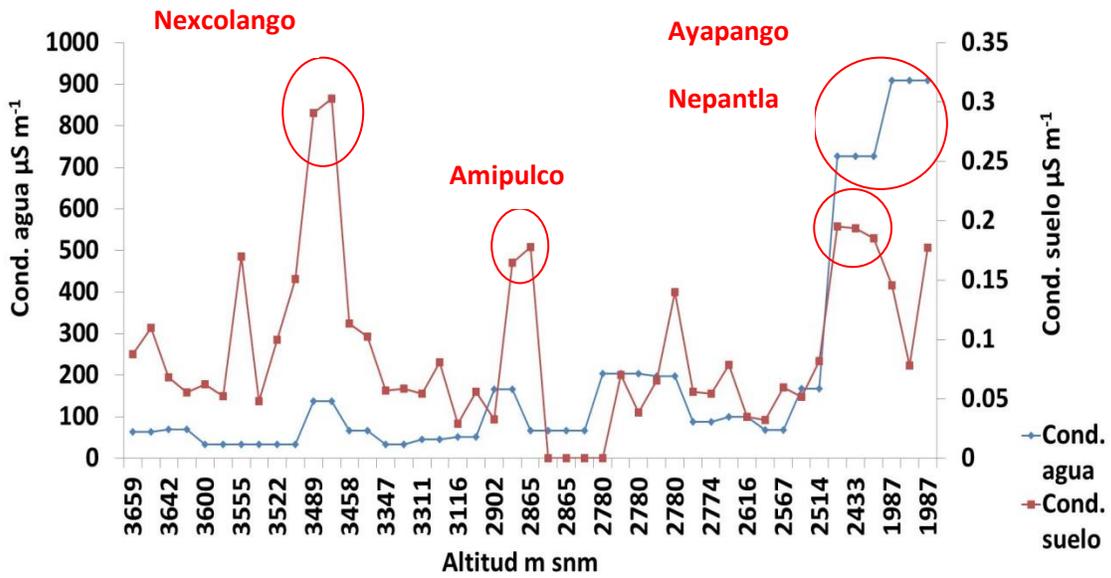


Figura 9. Comportamiento de la conductividad eléctrica a través del gradiente altitudinal

El análisis estadístico mostró que la temperatura ambiente presentó correlación significativa con la temperatura del suelo $r= 0.51$ y del agua de $r= 0.6$. La temperatura más baja se registró en Palo rechino con 4, 7 y 6 °C en suelo, ambiente y agua respectivamente, a una altitud de 3659 m. Es importante mencionar que existen escurrimientos provenientes del deshielo de los volcanes los cuales, se unen directamente o conforman las corrientes permanentes provocando el descenso de la temperatura en el agua. Las temperaturas que se registraron dependen de varios factores como la exposición, el clima, la altitud, la época de año, etc.

La altitud presenta un efecto importante sobre las variaciones de temperatura y se comportan de manera inversa a lo largo del gradiente altitudinal, figura 7. Las temperaturas fueron tomadas entre las 10 h y 18 h. Las mayores temperaturas se registraron en sitios con usos de suelo recreativos, agropecuarios y urbanos como: Tepepotl (6, 11 y 6 °C), Huehuetla (16, 17 y 15 °C), Tomacoco (13.5, 18 y 11 °C), Coapexco (12, 14 y 8.5 °C), Ayapango (16, 18 y 15 °C) y Nepantla (15, 19 y 17 °C) en suelo, agua y ambiente, en un intervalo de 2780 a 1987 m snm .El aumento de la temperatura genera una menor disolución de oxígeno en agua y pérdida de humedad en el suelo. Por otra parte estos sitios además de su posición altitudinal, tienen pérdidas de vegetación arbórea y arbustiva lo repercute en menor sombra y propicia que la radiación solar llegue directamente provocando un aumento en la temperatura.

Según Ferreras *et al.*, (1999), la temperatura desempeña un papel fundamental en el ecosistema, por que afecta la solubilidad iónica, solubilidad de gases y densidad, entre otros. La alteración de la temperatura en el agua genera un desequilibrio en el metabolismo del sistema. En el suelo es un factor importante para la germinación, cambiar el uso de suelo altera el régimen térmico en dos sentidos: por un lado se modifica la cobertura vegetal, con lo cual varia el coeficiente de reflexión que influye en la entrada y salida de energía calórica de la superficie del suelo, por otro lado se modifican las propiedades físicas del suelo, la densidad aparente, la porosidad y el contenido del agua. Ferreras *et al.*, (1999) determinó que los suelos mejor conservados o aquellos que no han sido alterados para otros usos, registran menores fluctuaciones de temperatura en la capa superficial del suelo, siendo favorable para la vegetación.

El pH del agua presentó correlación baja con pH potencial de $r= 0.33$, sin embargo, fue significativa ($p.< 0.05$). Su relación con la altitud se observa en la figura 8, a mayor altitud se encontraron valores de pH que tiende hacia la acidez, en agua entre 5 y 6 en localidades como Palo rechino y Apatlaco en donde se muestra una tendencia a que el CO_2 está dominando el sistema, ya que en presencia de agua forma ácido carbónico, el cual le da carácter ácido $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$. Al disminuir la altitud el CO_2 comienza a ser escaso y empiezan a predominar los bicarbonatos provenientes del desgaste o disolución de las

rocas. A menor altitud, se observó un incremento en el pH con valores de 8 a 8.7, el gráfico muestra que el pH aumenta conforme el grado de perturbación y la erosión en el suelo es mayor. La pérdida de vegetación provoca que las rocas y el suelo queden expuestos al lavado; lo que enriquece la concentración de carbonatos y bicarbonatos en el sistema provocando un aumento en el pH.

De los 1987 a 2700 m los suelos están más erosionados debido a las actividades agrícolas y urbanas exponiéndolos al arrastre de sólidos, facilitando el transporte de estos compuestos al agua. En cuanto al suelo, se encontraron suelos moderadamente ácidos por la gran cantidad de materia orgánica presentes en ellos a moderadamente básicos, se registraron valores de 4.3 en la localidad de Agua marrano y Tierra amarilla que se encuentran a una altitud de 3500 a los 3300 m en donde el uso de suelo es forestal. Los valores más altos se encontraron por debajo de los 2600 m registrándose valores de 8.2 en la localidad de Ayapango y Nepantla, las comunidades urbanas producen una elevación en el pH debido a la pérdida de la vegetación y materia orgánica, además, los suelos están sujetos al aporte directo sales provenientes de las viviendas, aunado a esto frecuentemente son depositados desechos de construcción que al ser lavados o arrastrados generan un pH alcalino.

La conductividad eléctrica del suelo presentó correlación significativa con la conductividad del agua de $r = 0.38$, los resultados obtenidos se muestran en la figura 9. La conductividad eléctrica en el agua aumentó conforme disminuye el gradiente altitudinal. A mayores altitudes los valores de la conductividad son bajos por la mínima cantidad de iones que son incorporados al agua, la cobertura vegetal en esas localidades brinda un filtro natural el cual impide que los iones sean transportados hacia el sistema, la naturaleza de los suelos es determinante para el transporte de iones y cationes. Palo rechino con $64 \mu\text{S m}^{-1}$, Apatlaco con $70 \mu\text{S m}^{-1}$, Agua marrano con $34 \mu\text{S m}^{-1}$, La venta con $33 \mu\text{S m}^{-1}$ y Tierra amarilla con $46 \mu\text{S m}^{-1}$ presentaron los valores más bajos en conductividad eléctrica en agua.

La conductividad eléctrica en el suelo se comportó de manera inversa a la altitud y se muestra en la figura 9. En la mayoría de las localidades se mantuvo por debajo de $0.1 \mu\text{S m}^{-1}$ a excepción de Amipulco con $0.17 \mu\text{S m}^{-1}$, Ayapango con $0.19 \mu\text{S m}^{-1}$ y Nepantla con $0.20 \mu\text{S m}^{-1}$. Según la norma NOM-021-SEMARNAT-2000 los suelos de estas localidades se consideran como no salinos por la naturaleza ácida de el material parental que los forma (andesitas, dasita y riolita). Las sales que son incorporadas como fertilizantes ricos en fosfatos y compuestos derivados del nitrógeno como amonio y nitratos repercuten directamente en las lecturas de la conductividad eléctrica en agua y suelo ya que parte de estas sales son arrastradas hacia el caudal. Según Cruz (2009), los grupos de suelos presentes a ambos lados del curso de agua en arroyos presentes corresponden a regosoles y litosoles que son suelos jóvenes indiferenciados así como andosoles, húmicos, ocricos y umbricos a partir de material

de ceniza volcánica y ricos en materiales amorfos que se distinguen por su capacidad de fijación de fosfato y otros aniones. La porosidad de la mayor parte de los suelos forestales varía de 35 a 65 % y los suelos que sostienen bosques mixtos pueden tener mayor volumen poroso que aquellos que sostienen bosques de una sola especie dominante. En las localidades con mayor cobertura vegetal, la conductividad eléctrica disminuye por la lixiviación de algunos compuestos hacia horizontes más profundos por la porosidad del suelo. La conductividad eléctrica más alta en suelo se registró en Nexcolango con $0.29 \mu\text{S m}^{-1}$, puede atribuirse a aportaciones de iones producidos por exhalaciones volcánicas siendo una localidad que se encuentra a 3489 m. Aunado a esto el agua también presentó un aumento repentino en la conductividad.

Zamora en (2002), determinó que el manejo inadecuado del suelo como la deforestación, prácticas de encalado y uso de fertilizantes, aceleran los cambios físicos y químicos en pH y conductividad eléctrica. La acumulación de sales también puede ser causada por aguas residuales industriales con concentraciones elevadas de compuestos tóxicos y sales. La elevada concentración iónica en el suelo indicada por los valores de conductividad eléctrica que se encontraron en las localidades de menor altitud es a causa del aporte de sales que se aplican en la agricultura. Es importante resaltar que se observó que las localidades que tienen mayor desequilibrio son aquellas que ya presentaron cambios de uso de suelo.

La figura 10 muestra la relación gráfica entre la conductividad eléctrica y la dureza del agua.

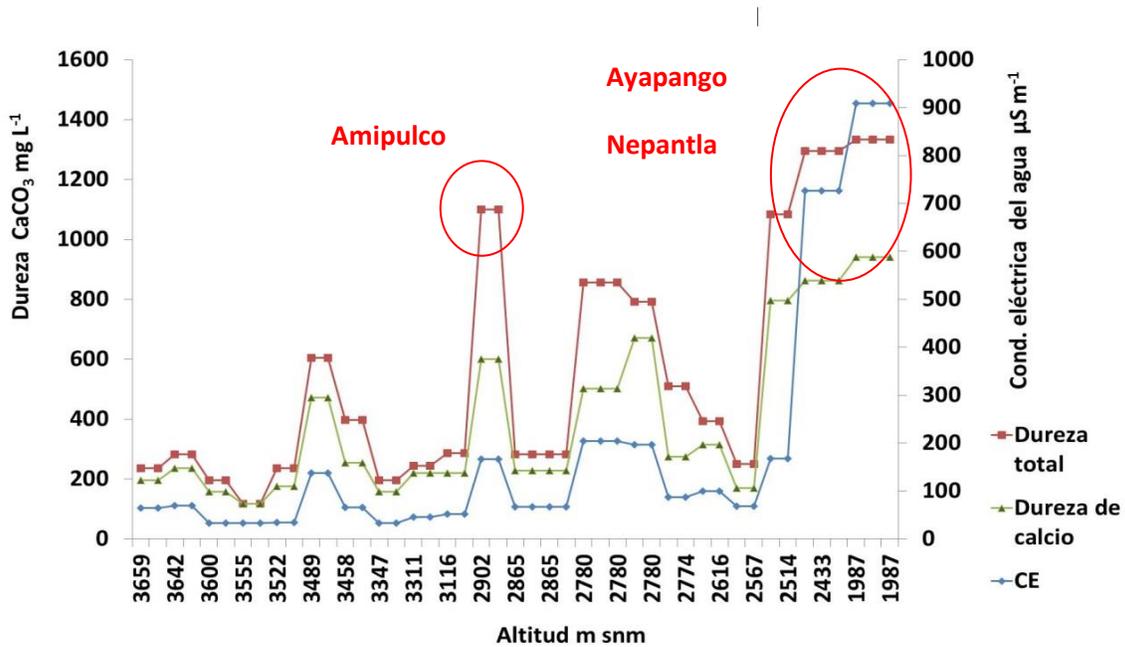


Figura 10. Relación entre CE y durezas a través del gradiente altitudinal

La conductividad eléctrica presentó correlación significativa con dureza total de $r = 0.83$ y dureza de calcio $r = 0.85$. Se observa el mismo comportamiento en los tres parámetros. La determinación de la dureza total se basa en la cuantificación de las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} y sirve para clasificar la dureza del agua. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, Guía para la calidad del agua) [disponible en línea] http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf [fecha de acceso 20 de marzo 2013]: el agua es blanda a una concentración menor a $60 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$, moderadamente dura de 61 a $120 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$, dura de 121 a $180 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ y muy dura mayores a $181 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$. Con base a esto se puede clasificar el agua como muy dura en todos los puntos de muestreo, a excepción de Apatlaco con 117 mg L^{-1} la cual se clasificaría como dura. En las localidades que se encuentran de 1900 a 2600 m la dureza total como la de calcio se disparó obteniendo concentraciones por arriba de los 1200 mg L^{-1} en Ayapango y Nepantla.

La dureza de calcio en aguas naturales depende principalmente del aporte de Ca^{2+} por la corteza terrestre, en especial por minerales como la calcita y dolomita. Las concentraciones tan elevadas son a causa del aporte de iones Ca^{2+} asociados a carbonatos, que son arrastrados hacia el caudal por la lluvia o el viento en suelos no forestales como agrícola, agropecuario. Vidales (2010), en su estudio limnológico y ficológico en los ríos Apatlaco, Puebla y Amatzinac, Morelos encontró que las concentraciones de calcio muy elevadas se deben al aporte de Ca^{2+} derivado de la actividad humana y agrícola.

Como lo muestran las figuras 11 y 12, la temperatura tiene una relación importante en la disolución de los gases tanto en el oxígeno como el CO_2 el cual se refleja en el pH del agua.

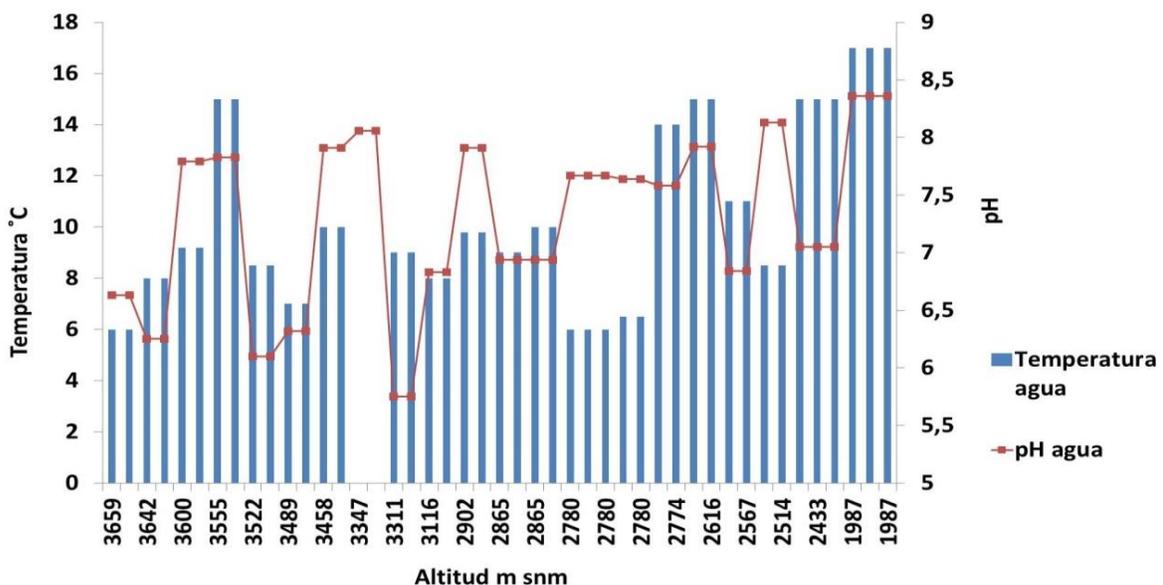


Figura 11. Relación entre temperatura del agua y pH a través del gradiente altitudinal.

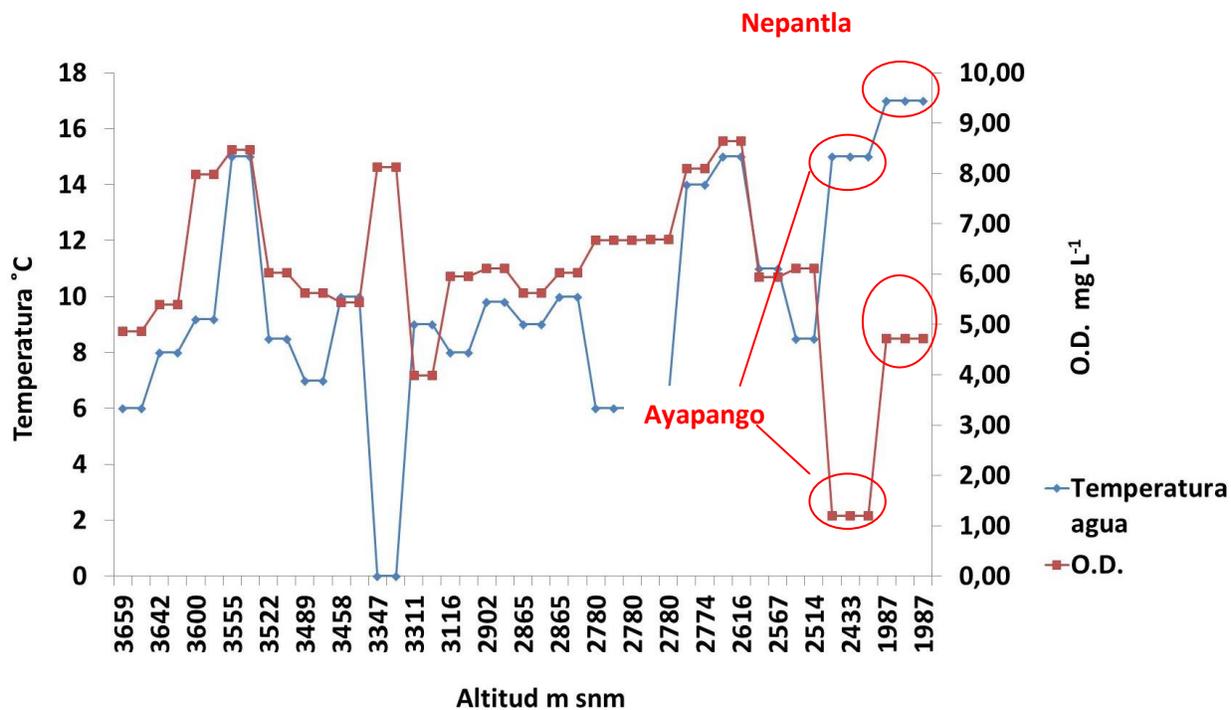


Figura 12. Relación entre temperatura del agua y OD a través del gradiente altitudinal.

La temperatura del agua presentó correlación significativa con coeficientes de $r= 0.41$ para pH y $r= 0.4$ para oxígeno. Como se observa en la figura 11, existe una tendencia lo largo del gradiente altitudinal, en donde el pH aumenta al aumentar la temperatura. Cuando el pH tiende hacia la acidez, existe una mayor concentración de CO_2 en el sistema, encontrándose los valores más bajos en localidades de mayor altitud y menor temperatura. Otro factor importante en el comportamiento del pH es el aporte carbonatos que entran formar parte del sistema generando pH básicos. El aumento de la temperatura genera una mayor solubilidad de iones.

En la figura 12, la mayor solubilidad del oxígeno en agua se observa en localidades mejor conservadas con uso de suelo forestal. Se encontró la concentración más alta a una altitud de 2616 m, en Huehuetla de 8.64 mg L^{-1} . En la mayoría de las localidades sigue un comportamiento directo con la temperatura, la concentración del oxígeno se debe a que los terrenos presentan pendientes y caídas de agua generando que la solubilidad del oxígeno dependa de varios factores, puede producirse por la acción fotosintética de las algas durante el día o ser capturado de la atmósfera, o depender también de la velocidad de la corriente. Es importante mencionar que no se comportó de manera esperada en las localidades urbanas.

La temperatura, aunado a las descargas de materia orgánica, juegan un papel importante en la concentración del oxígeno en las localidades urbanas. En Ayapango a una altitud de 2433 m la concentración de oxígeno tiende a disminuir con valores de 1.2 mg L^{-1} , esto refleja que el oxígeno está siendo utilizado por el proceso de oxidación y mineralización de algunos compuestos como sulfatos y nitratos, entre otros.

La solubilidad del oxígeno disminuye a medida que la temperatura del agua aumenta y que además es el principal factor que afecta el metabolismo respiratorio y la excreción de amonio en organismos acuáticos, el consumo de oxígeno incrementa con el aumento de la temperatura del agua (Valbuena, 2006).

Según Leal (2008), el oxígeno es parcialmente soluble en agua, fenómeno que depende de la altitud porque esto determina la concentración de oxígeno en la atmósfera y de la temperatura del agua. El incremento en la temperatura reduce la disolución de oxígeno en el agua superficial. En aguas frías, tres grados centígrados de incremento en la temperatura reduce la solubilidad de oxígeno en 1 mg L^{-1} . En cuerpos de agua cálidos, el mismo incremento en la temperatura reduce en 0.6 mg L^{-1} de oxígeno.

Un caso crítico lo constituyen los arroyos en donde el caudal ya es bajo y se tienen descargas de contaminantes de consideración. En las zonas aledañas del Parque Nacional Izta-Popo muchos cuerpos de agua sirven de receptores a descargas más allá de su capacidad de asimilación y dilución, con el consecuente incremento en la materia orgánica en ellos. En la figura 12, en las localidades Ayapango y Nepantla observamos el mismo comportamiento inverso que Leal (2008) en su estudio Evaluación de la afectación de la calidad del agua en cuerpos de agua superficiales y subterráneos por efecto de la variabilidad y el cambio climático y su impacto en la biodiversidad, agricultura, salud, turismo e industria.

NITRÓGENO

En la figura 13 (a y b) se observa el comportamiento del nitrógeno en suelo y agua a través del gradiente altitudinal

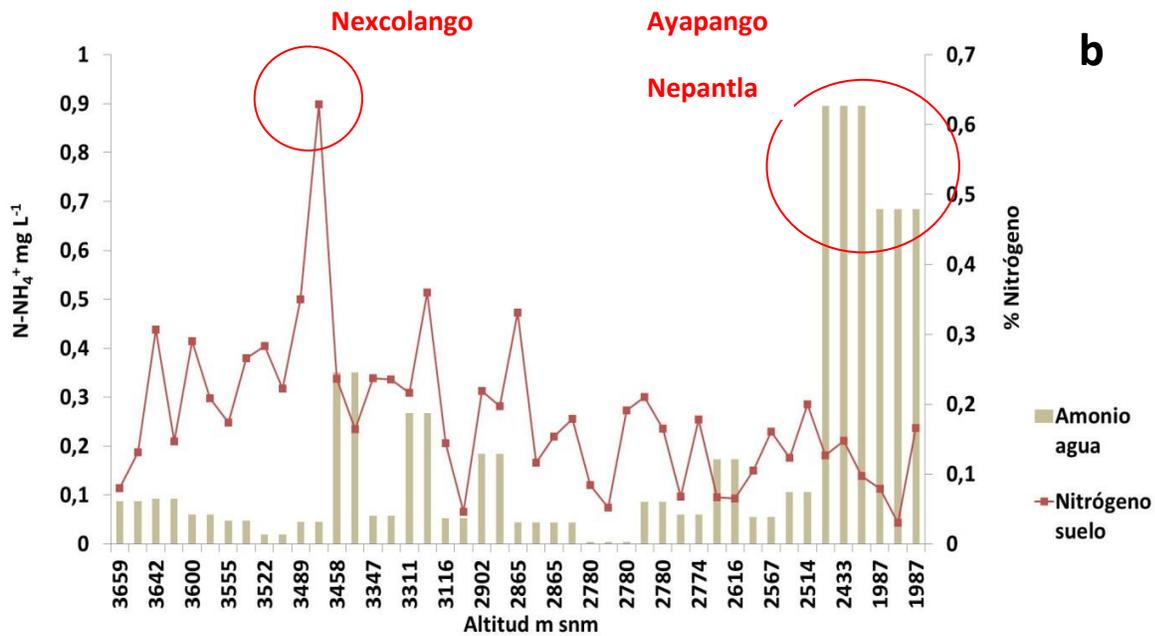
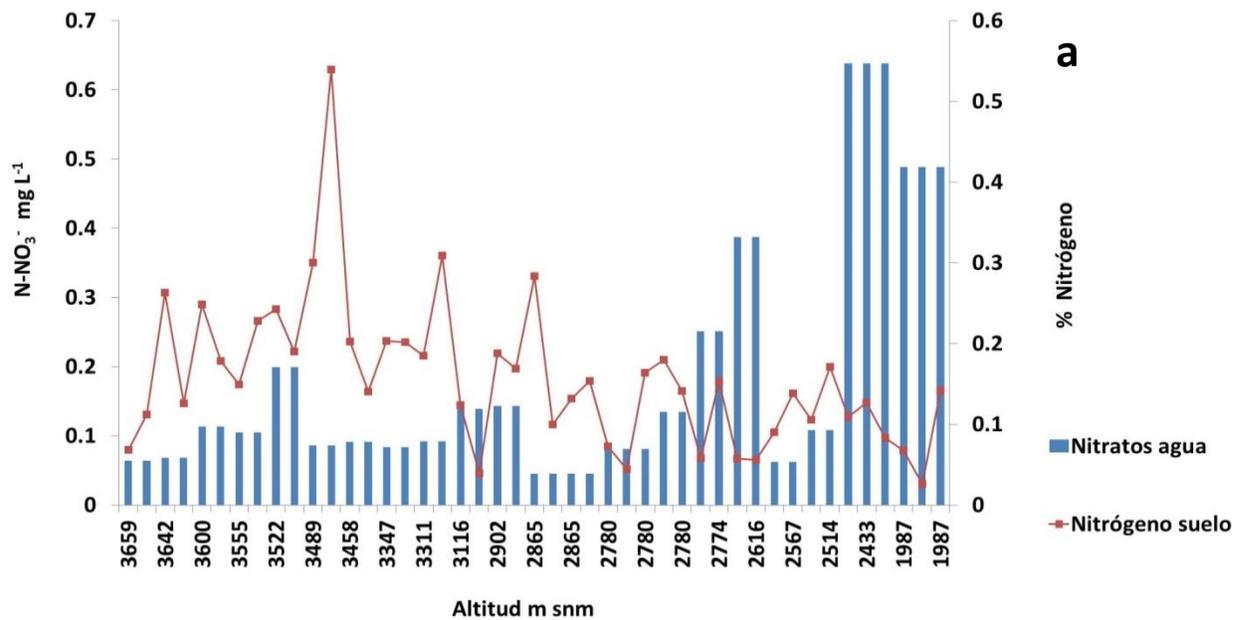


Figura 13. Comportamiento del nitrógeno (agua y suelo) a través del gradiente altitudinal

Los nitratos y el amonio presentan una relación inversa con el porcentaje de nitrógeno en el suelo, esto se debe a varios factores. En los suelos mejor conservados el porcentaje del

nitrógeno fue mayor que en suelos que presentaron un determinado uso de suelo como recreativo, agropecuario o agrícola, estas localidades se encuentran a una altitud de 2600 a los 1900 m, en algunas de ellas se encontró un porcentaje de nitrógeno 0.03 % como en Nepantla la cual se caracteriza por tener grandes asentamientos urbanos.

Por otra parte, las localidades mejor preservadas o que tienen suelo forestal el porcentaje de nitrógeno es mayor como Nexcolango el cual presentó 0.62 % y se encuentra a una altitud 3462 m, es importante mencionar que el nitrógeno depende en gran parte de la materia orgánica y el tipo de vegetación presentes en el suelo, ya que en aquellas localidades en donde existe la presencia de pastizal como Palo Rechino a una altitud de 3659 se registraron menores porcentajes de nitrógeno 0.08 y 0.13 % .

El nitrógeno en el agua en sus formas químicas de nitratos y amonio aumentó considerablemente en las localidades urbanas obteniéndose concentraciones de $0.54 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ y $0.89 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ L}^{-1}$ en la localidad de Ayapango a 2433 m de altitud. Los mismos parámetros a mayor altitud son considerablemente bajos registrándose concentraciones que van de 0.05 a $0.08 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ y 0.4 a $0.8 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ L}^{-1}$ en un intervalo altitudinal de 3659 a 2780 m.

Tomacoco presentó concentraciones bajas de N-NO_3^- 0.05 mg L^{-1} y N-NH_4^+ 0.007 mg L^{-1} a una altitud 2567 m, esto se debe a que la vegetación utilizó nitratos y amonio para su desarrollo ya que es un sitio dedicado a la agricultura. El porcentaje de nitrógeno en el suelo presentó una correlación baja, sin embargo significativa ($p < 0.05$) de $r = -0.35$ con N-NO_3^- y $r = -0.34$ con N-NH_4^+ .

Con base a estos resultados, las altas concentraciones de nitrato y amonio en el agua están relacionadas con la perturbación y la erosión del suelo o desechos domésticos vertidos directamente en el caudal. Según Arauzo *et al.*, (2006), al realizar un estudio sobre la dinámica espacio temporal del contenido de nitrato de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del río Oja en España, encontró que la escorrentía y filtración de las aguas con alto contenido de nitrato procedente de prácticas de fertilización agrícola, genera un grave problema de contaminación de los recursos hídricos en donde se pueden encontrar altas concentraciones de nitrato que pueden afectar la salud humana y la calidad ambiental, estos problemas derivan del efecto combinado de una excesiva fertilización nitrogenada y prácticas de riego poco optimizadas en las zonas agrícolas.

Ayala (2011), encontró un comportamiento similar, determinó que la concentración de nitratos y amonio en el agua se comportan de manera muy parecida y que las concentraciones más altas corresponden a sitios urbanos, enseguida, en las localidades que

presentan actividad ganadera y recreativa y que estos parámetros a su vez tienen una relación en mayor medida con DQO, alcalinidad, durezas y fósforo total.

Se observa la relación entre nitratos, amonio, espacio poroso y la densidad aparente en las siguientes figuras 14-15.

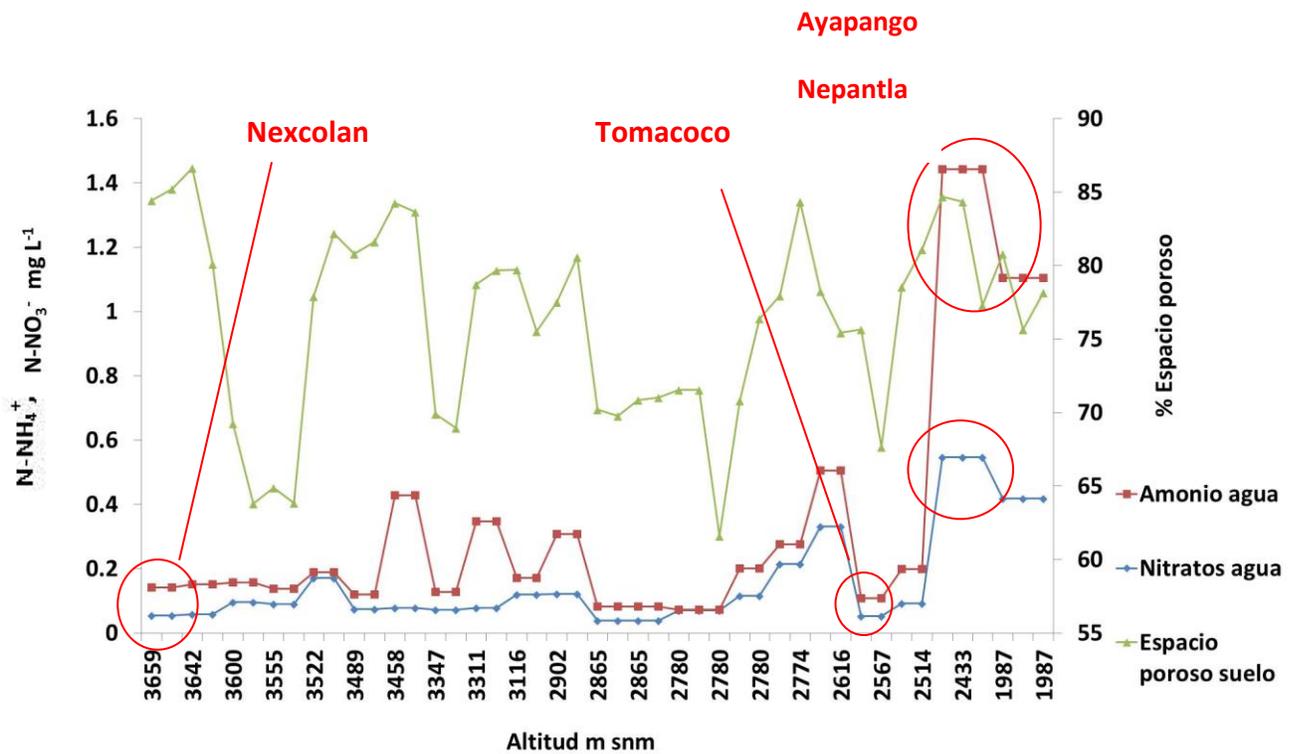


Figura 14. Relación entre nitratos, amonio y espacio poroso a través del gradiente altitudinal.

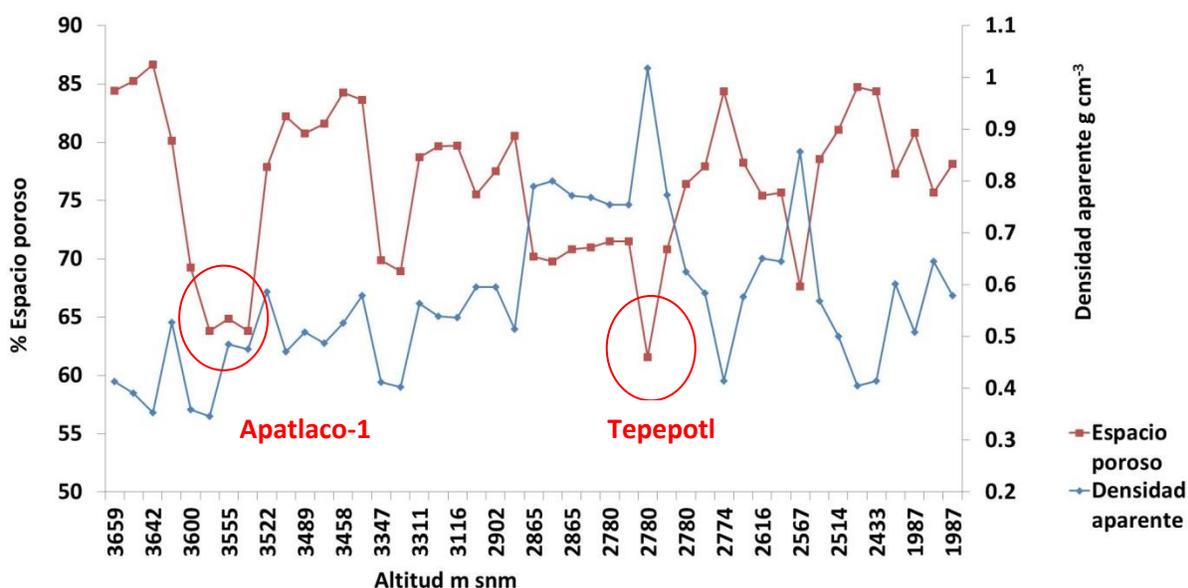


Figura 15. Relación entre densidad aparente y espacio poroso a través del gradiente altitudinal.

Los nitratos y el amonio presentaron correlación significativa con el porcentaje de espacio poroso, obteniendo $r = 0.3$ para $N-NO_3^-$ y $r = 0.37$ para $N-NH_4^+$. Es importante mencionar que en las localidades con mayor porcentaje de espacio poroso la concentración de nitratos y amonio aumentó. La estructura del suelo juega un papel importante en el transporte de los iones hacia el sistema acuático. Se midió la textura del suelo en cada una de las localidades para poder comprender esta dinámica, comparamos dos localidades con diferente textura y altitud y un uso de suelo forestal y urbano. Como se muestra en el cuadro 4 existe una proporción adecuada entre arcilla, limo y arena en la localidad de Nexcolango en donde se obtuvo una clase textural marga arenosa y se encuentra a una altitud de 3489 m, la concentración de compuestos nitrogenados en agua es baja con $0.07 \text{ mg } N-NO_3^- \text{ L}^{-1}$ y $0.01 \text{ mg } N-NH_4^+ \text{ L}^{-1}$ considerando las altas concentraciones que se encuentran a menores altitudes, es importante mencionar que es una localidad forestal la cual presentó una gran diversidad vegetal en donde los iones son retenidos o incluso utilizados por las plantas.

En Ayapango y Nepantla, localidades que se encuentran a 2433 y 1987 m en donde el uso de suelo es urbano, la clase textural que se determinó fue arena margosa en donde más del 80 % de la estructura es arena facilitando la infiltración de compuestos arrastrados por el agua o vertidos directamente hacia el caudal aumentando la cantidad de iones al sistema, las concentraciones registradas son 0.54 y $0.41 \text{ mg } N-NO_3^- \text{ L}^{-1}$, 0.9 y $0.7 \text{ mg } N-NH_4^+ \text{ L}^{-1}$.

Según Arauzo *et al.*, (2006) la infiltración es un factor importante en la lixiviación de los iones como nitratos. El movimiento de este ion desde la zona saturada hacia los acuíferos puede desencadenarse durante la mayor parte del año en los periodos de cultivo o bien, por efecto de las lluvias. Este proceso en grandes aportaciones del ion, da como resultado un proceso de contaminación que surge de la interacción entre dos factores, la permeabilidad del suelo, que favorece a cualquier proceso de drenaje y lixiviación desde la zona saturada hacia el acuífero subyacente.

Cuadro 4. Estructura del suelo.

Localidad	Altitud	Uso de suelo	% Arcilla	% Limo	% Arena	Textura
Palo rechino 1	3659	Forestal	8	18	74	Marga arenosa
Palo Rechino 2	3642	Forestal	2,72	5,28	92	Arenosa
Apatlaco 1	3600	Recreativo	10,72	15,28	74	Marga arenosa
Apatlaco 2	3555	Acuacultura	4	24	72	Arena margosa
Agua Marrano	3522	Forestal	6,72	25,28	68	Marga arenoso
Nexcolango	3489	Forestal	18,72	31,28	50	Marga arenoso
Atlamaya	3458	Forestal	0	10	90	Arenosa
La venta *	3347	Acuacultura	6	14	80	Arena margosa
Tierra Amarilla	3311	Forestal	8	18	74	Marga arenoso
C. Tesanto	3116	Forestal	14	2	84	Arena margosa
Amipulco	2902	Perturbado	12,72	29,28	58	Margosa
Alcalica bajo	2865	Forestal	12	18	70	Marga arenoso
Tepepotl 1	2780	Recreativo	4,72	27,28	68	Marga arenosa
Tepepotl 2	2780	Acuacultura	4,72	15,28	80	Arena margosa
Cacaloa	2774	Forestal	11,44	16,56	72	Marga arenosa
Huehuetla	2616	Forestal	4,72	25,28	70	Marga arenosa
Tomacoco	2567	Agropecuario	2	10	88	Arena margosa
Coapexco	2514	Agrícola	4,72	19,28	78	Arena margosa
Ayapango	2433	Urbano	14	2	84	Arena margosa
Nepantla	1987	Urbano	4	14	82	Arena margosa

Existen otros factores que propician el aporte de nitratos y amonio al sistema acuático; por un lado están los suelos que presentan gran infiltración y por otro los suelos con gran compactación y un porcentaje de espacio poroso muy pobre, favoreciendo el aporte directo por arrastre sobre la superficie del suelo de algunos iones hacia el caudal. Es importante mencionar que el espacio poroso y la densidad aparente se comportan de manera inversa como lo muestra la figura 15, esto se presenta en localidades en donde el uso de suelo no es forestal y es utilizado para uso recreativo como; Tepepotl, en donde se producen grandes movimientos de vehículos, personas y la zona ribereña es altamente modificada por el paso de personas que se dirigen hacia el caudal compactando y cambiando la textura del suelo.

En esta localidad el porcentaje de espacio poroso tiende a disminuir encontrándose valores de 61.5 %, sin embargo la densidad aparente aumentó considerablemente hasta obtener por arriba de 1 g cm^{-3} .

Otra localidad que presenta un comportamiento similar es Tomacoco, que es de uso agropecuario; el porcentaje de espacio poroso que se encontró en este sitio fue de 67.6 % con una densidad aparente de 0.85 g cm^{-3} , en esta localidad la concentración de amonio y nitratos fue bajos, esto puede deberse a que los cultivos estén utilizando estos iones para su consumo.

Según Pritchett (1991), el pisoteo excesivo por los animales de pastoreo, el uso de maquinaria pesada y tala, además del uso recreativo intenso o las perturbaciones cuando los suelos están húmedos, aumentaran los valores de densidad aparente lo cual tiene un impacto directo en las zonas perturbadas dando una densidad aparente mayor, aunque se reduce el porcentaje de espacio poroso. La densidad aparente de los suelos forestales varía desde 0.2 en algunas capas orgánicas hasta 1.9 en las arenas gruesas. La cantidad y naturaleza de la materia orgánica del suelo así como la actividad de la flora y la fauna del suelo, influyen en el volumen poroso así como la estructura del suelo, el volumen poroso de los suelos sembrados con árboles suele ser mayor que un suelo similar que se utilice para fines agrícolas, la porosidad en la mayor parte de los suelos forestales es de 40 a 65 %. Los suelos que sostienen bosques mixtos de árboles, pueden tener un mayor volumen poroso que los suelos que sostienen una sola especie dominante. Sin embargo, los efectos a largo plazo serían probablemente la disminución de volumen poroso debido a la destrucción de las capas orgánicas del suelo y la compactación de maquinaria y de la lluvia, es decir, que favorecería al transporte de nutrimentos al sistema acuático más fácilmente.

En la figura 16 se muestra la relación gráfica que existe entre nitratos, amonio y pH del suelo.

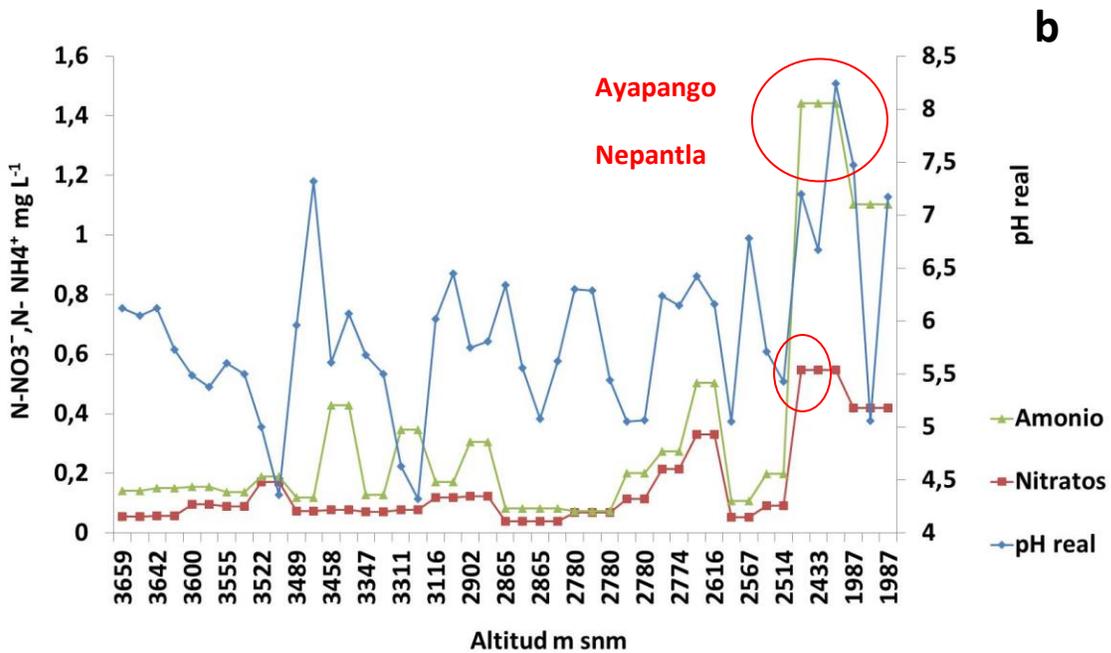
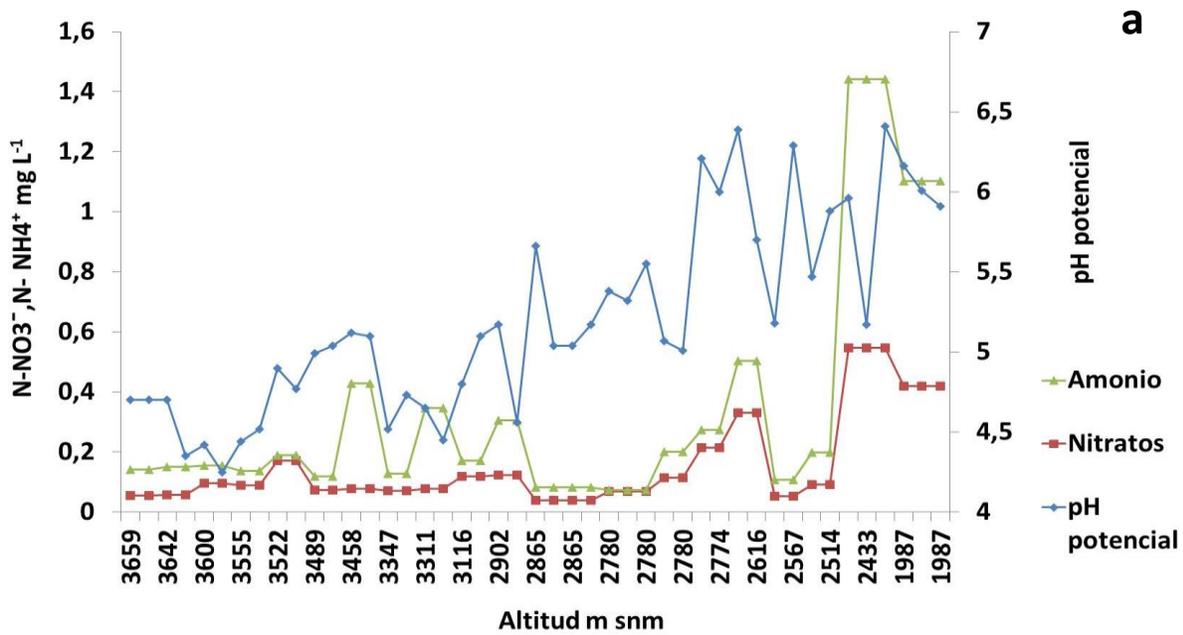


Figura 16. Relación entre pH potencial (a)- real (b) y nitratos-amonio a través del gradiente altitudinal

Nitratos presentó correlación significativa con las siguientes variables: pH real de $r = 0.53$ y potencial $r = 0.58$. El amonio presentó correlación significativa con pH real $r = 0.50$ y pH potencial de $r = 0.43$. El aumento del pH en el suelo genera la entrada de aniones y cationes al caudal aumentando su concentración. Como puede observarse en la figura 16, en las localidades dedicadas a la agricultura y urbanas el nitrógeno en sus diferentes formas

aumentó de los 2514 a 1987 m. Cuando se genera un aumento en el pH del suelo por la degradación propicia el arrastre de carbonatos y esto repercute en el aumento de las durezas en el agua.

El aumento en el pH real y potencial se ve reflejado con la conductividad eléctrica en el suelo, tienden a seguir el mismo comportamiento en Coapexco, Ayapango y Nepantla obteniendo las concentraciones más altas en nitratos y amonio, el pH real más elevado se registró en Nepantla con 8.4. Las localidades forestales obtuvieron el pH real más bajo el cual tiende hacia la acidez como: Agua Marrano con un pH real de 5, Tierra Amarilla con 4.6 y Alcalica con pH de 5.

La figura 17 muestra el comportamiento entre nitratos, amonio y la temperatura del suelo a través del gradiente altitudinal.

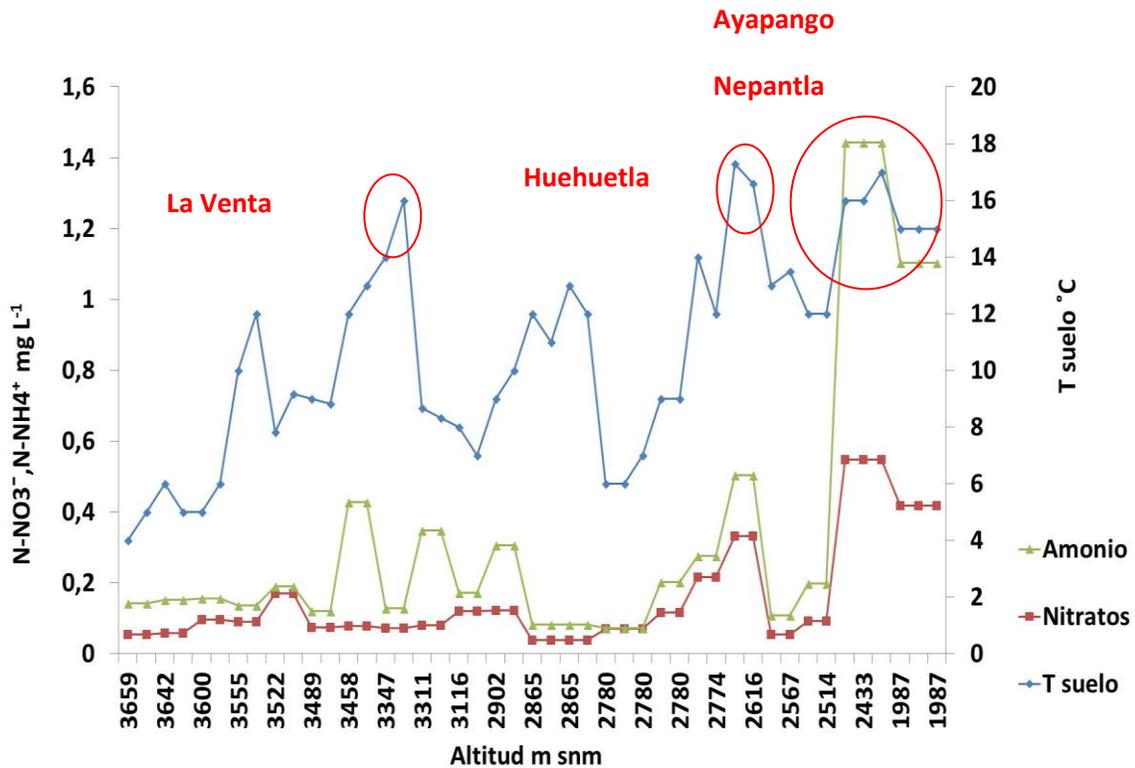


Figura 17. Relación entre temperatura del suelo, nitratos y amonio a través del gradiente altitudinal

La temperatura del suelo presentó correlación significativa con nitratos de $r=0.62$ y amonio $r=0.55$, en la localidades donde se registró una mayor temperatura en el suelo la

concentración de nitratos y amonio es mayor. A partir de los 2616 a los 1987 m la temperatura asciende, en Huehuetla, Ayapango y Nepantla se registraron las temperaturas más altas de 17.3, 17, y 15 °C (figura 17). Es importante mencionar que la estructura y la temperatura del suelo desempeñan un papel importante en el transporte y la concentración de nutrimentos como amonio y nitratos en el agua, por un lado está la falta de vegetación que propicia que la temperatura del suelo aumente, ya que la radiación solar llega directamente al suelo generando que el proceso de descomposición de la materia orgánica se acelere, aunado a esto son sitios dedicados a la agricultura o zonas urbanas en donde los desechos domésticos son vertidos directamente hacia el caudal.

Ceccon (2003), reportó que la urbanización aumenta la variedad y cantidad de contaminantes transportados al caudal, sedimentos de áreas de construcción, aceites, químicos tóxicos de automóviles, nutrimentos, pesticidas de jardines, así como metales pesados. Actualmente, entre los impactos generados por las actividades agrícolas, la erosión del suelo es considerada como uno de los problemas más importantes en el manejo de ecosistemas, han sido señaladas como la mayor fuente de contaminación difusa de ríos y lagunas. El movimiento de grandes masas de suelo para implantación de cultivos, pisoteo de los márgenes desprotegidos de los ríos, además de la propensión natural del suelo a la erosión, libera sedimentos que alcanzan los cursos del agua. La pérdida de bosques ribereños genera el transporte de nutrimentos en forma de solución provenientes de ecosistemas terrestres ya que estos no son retenidos ni absorbidos por la vegetación, una cierta cantidad de amonio y nitratos esta ligada a los sedimentos los cuales son transportados directamente hacia el caudal.

En la figura 18 y 19 se muestra la relación directa entre nitratos, amonio y la conductividad eléctrica en agua y suelo a través del gradiente altitudinal.

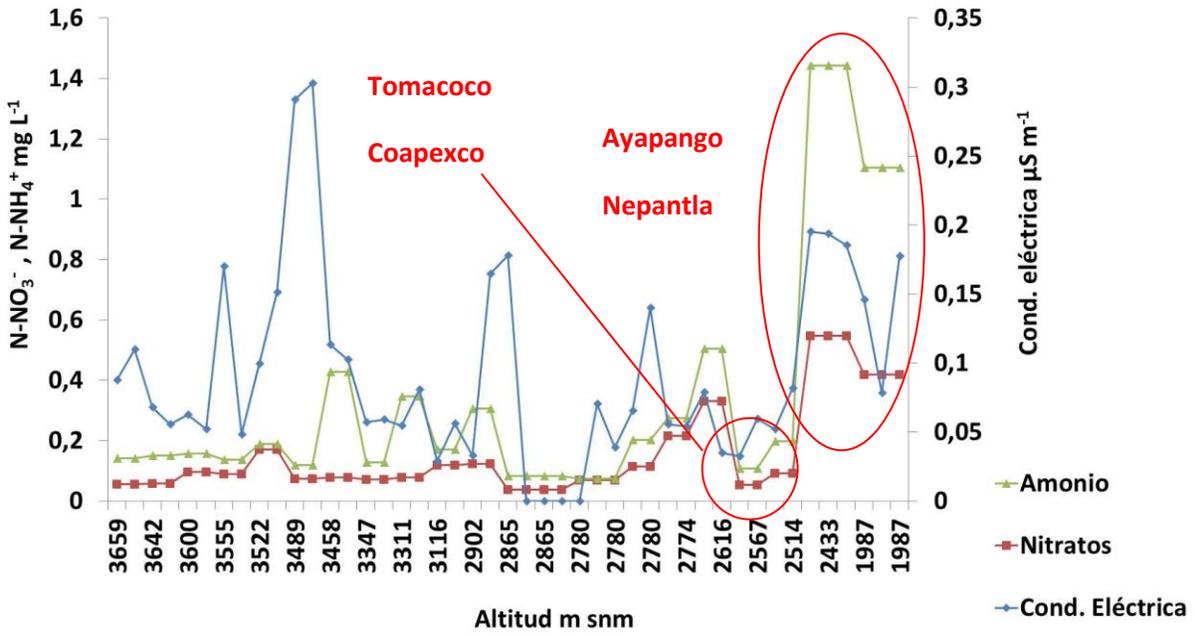
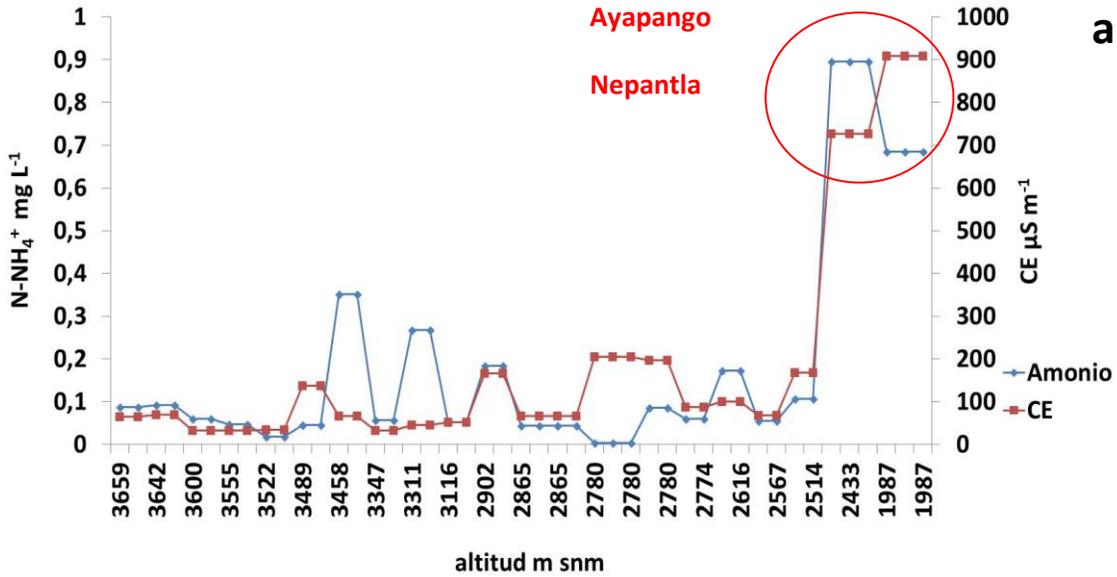


Figura 18. Relación entre conductividad eléctrica (suelo), nitratos y amonio a través del gradiente altitudinal.



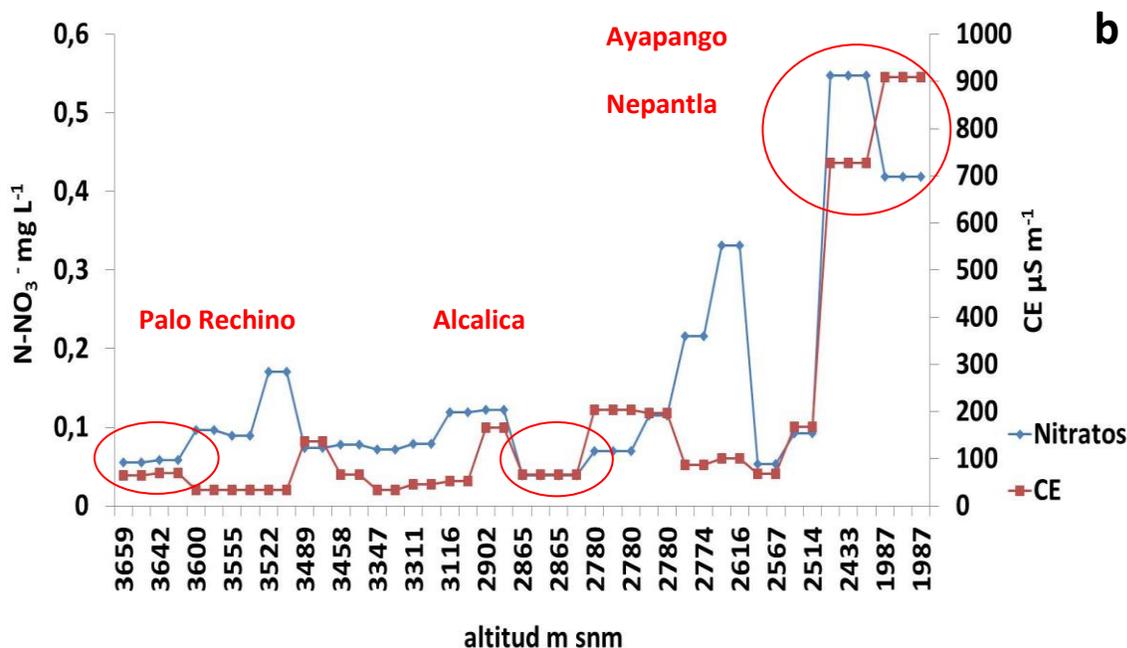


Figura 19. Relación entre amonio (a) nitratos (b) y conductividad eléctrica (agua) a través del gradiente altitudinal

De 2780 a 1987 m, la presencia de sales que son incorporadas al suelo se refleja en la entrada de iones al caudal. La conductividad eléctrica del suelo presentó una correlación baja, sin embargo, significativa con nitratos de $r= 0.36$ y amonio de $r= 0.40$. Nexcolango registró la mayor conductividad eléctrica con $0.30 \mu\text{S m}^{-1}$, siendo una localidad forestal y que presentó la mayor concentración de sales, las cuales son retenidas en el suelo. Existe un descenso en la conductividad eléctrica en las localidades dedicadas a la agricultura, Tomacoco y Coapexco con 0.03 y $0.08 \mu\text{S}$, es evidente que los iones fueron utilizados por la vegetación para su crecimiento, sin embargo, aumenta en las localidades urbanas de Ayapango y Nepantla con 0.19 y $0.14 \mu\text{S m}^{-1}$, en donde el suelo está en contacto con desechos domésticos ricos en sales que son incorporados o vertidos directamente, esto a su vez afecta la conductividad eléctrica del agua, Los valores de mayor concentración de sales fueron de 727 y $909 \mu\text{S m}^{-1}$ figura 19.

Nitratos y amonio registraron correlación significativa con la conductividad eléctrica en el agua de $r= 0.84$ y $r= 0.88$ y su comportamiento se muestra en la figura 19.

Como puede observarse en la figura 20, la concentración de nitratos y amonio están relacionados directamente con la dureza total. Se presentó correlación significativa $r= 0.66$.

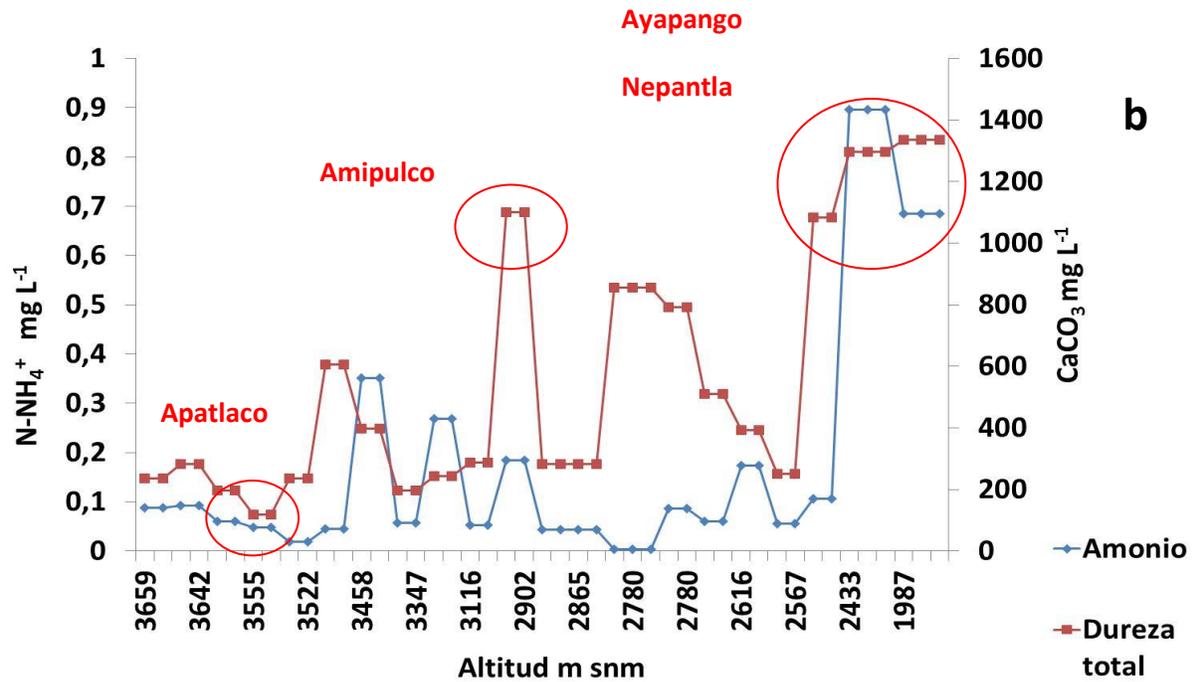
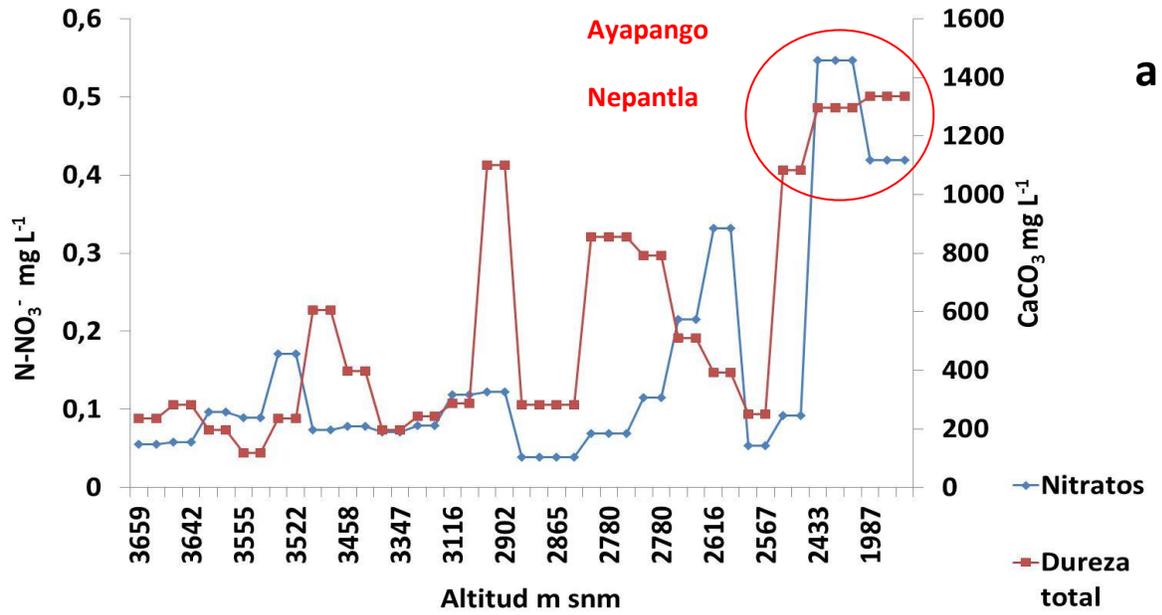


Figura 20. Relación entre nitratos (a), amonio (b) y dureza total y a través del gradiente altitudinal.

Se observa la tendencia a lo largo del gradiente altitudinal a aumentar considerablemente en las localidades de menor altitud, el ingreso de carbonatos es considerable en aquellas localidades que se encuentran a 2567 a 1987 m, tienden a dispararse hasta obtener las concentraciones más altas las cuales se registraron desde 1083 a 1334 mgL⁻¹. El aporte de carbonatos asociados con calcio y magnesio provenientes del arrastre por la lluvia o el viento en suelos desnudos o más erosionados propician el aumento en la dureza total. Por otra parte, Apatlaco y Alcalica presentaron las menores concentraciones 117.7 y 282.5 mgL⁻¹ CaCO₃.

Según Flores *et al* (2009), el nitrógeno de origen orgánico e inorgánico aplicado al suelo está directamente vinculado con el contenido de nitratos y amonio. Los nitratos pueden lixiviar y contaminar las aguas subterráneas o transportarse en el escurrimiento hacia las aguas superficiales junto al N amoniacal, la cual se refleja en la conductividad eléctrica. El nitrógeno en sus diferentes formas es transportado en mayores concentraciones en suelos dedicados a la agricultura y en el caso contrario, aquellos suelos conservados o que presentaban plantas nativas tendían a retener los nutrimentos. Como puede observarse en la ilustración el arrastre de aniones y cationes se ve reflejado en la conductividad eléctrica y las durezas.

Existe una relación directa entre el porcentaje de materia orgánica y el de nitrógeno presentes en el suelo y se muestra en la figura 21.

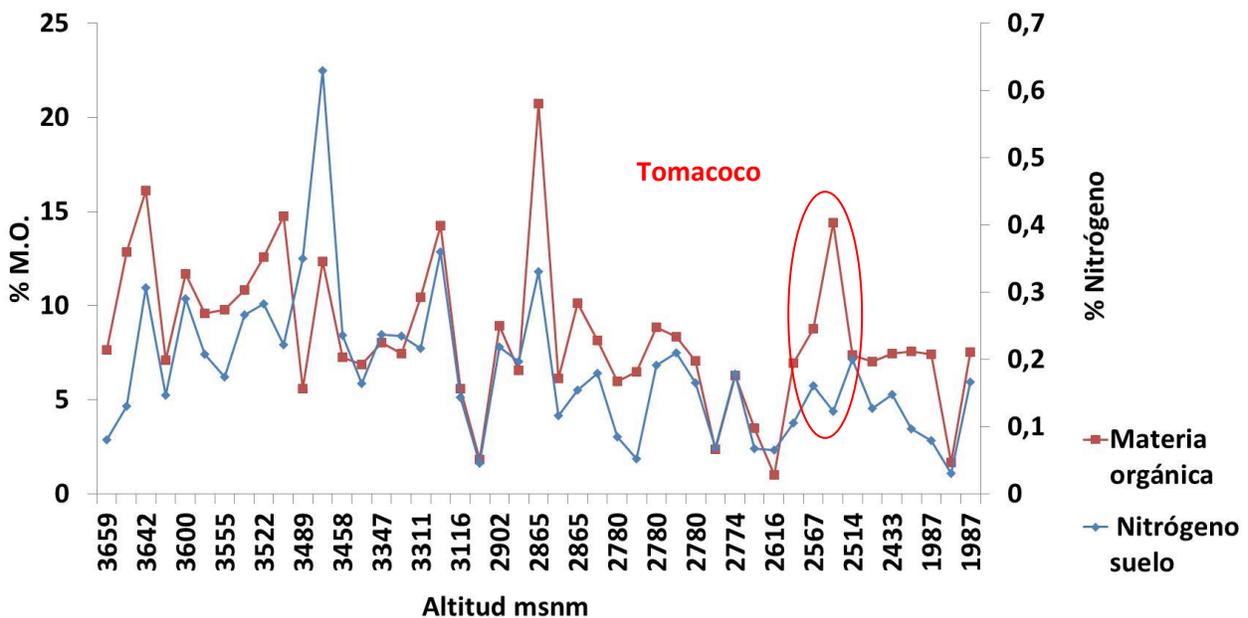


Figura 21. Relación entre materia orgánica y nitrógeno total a través del gradiente altitudinal.

Con base en el análisis estadístico de correlación múltiple se obtuvo correlación significativa de $r= 0.60$. Como lo muestra la figura 21, el porcentaje de nitrógeno en el suelo depende principalmente de la cantidad de materia orgánica, la concentración de nitrógeno total en suelo fue de 0.36 a 0.62 % en suelos forestales o mejor preservados. La grafica muestra la tendencia a disminuir en ambos parámetros a través del gradiente altitudinal. El nitrógeno y la materia orgánica son dos propiedades fundamentales para evaluar la fertilidad del suelo. Es evidente que la fertilidad disminuye a consecuencia de la pérdida de la materia orgánica y la disminución del mantillo y el humus, provocando que el suelo quede expuesto a la erosión eólica e hídrica

En la localidad de Tomacoco se encontró que el porcentaje de materia orgánica aumenta a 8.7 % y por el contrario el nitrógeno disminuye a 0.1, este comportamiento es a causa del aporte de fertilizantes o productos orgánicos para la siembra, ya que es una localidad agropecuaria, la disminución del nitrógeno es este mismo punto se debe a que la vegetación con ayuda de microorganismos absorbe parte para su desarrollo.

La figura 22 y 23 muestra la relación gráfica entre pH real, conductividad eléctrica y materia orgánica a través del gradiente altitudinal.

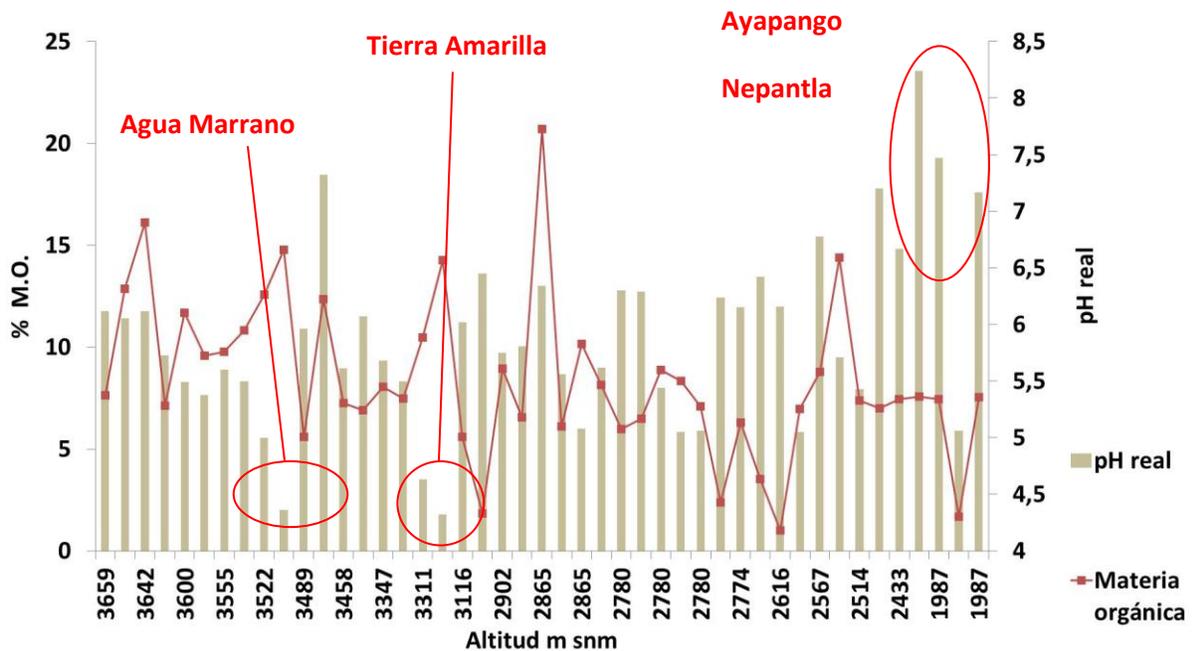


Figura 22. Relación entre la materia orgánica y el pH a través del gradiente altitudinal

El pH del suelo depende en gran medida por la cantidad de materia orgánica presente en el sistema. Se obtuvieron pH moderadamente ácidos a neutros de 5 a 7 en la mayor parte de los sitios. Las localidades forestales que presentan un porcentaje de materia orgánica mayor registraron los pH más ácidos: Agua Marrano con un pH 4.9, Tierra Amarilla con pH 4.6, y Alcalica con un pH 5.4, los suelos de estas localidades son considerados ácidos. Los desechos de la vegetación y de la fauna generan materia orgánica que al descomponerse propicia una disminución del pH.

A partir de los 2780 el aumento de pH es considerable, en localidades dedicadas a la agricultura y agropecuario se genera una pérdida de la capa superficial del suelo por los métodos inadecuados de siembra, extracción de nutrientes y uso de fertilizantes generando un aumento en el pH. En localidades de menor altitud como Ayapango y Nepantla que se encuentran de los 2433 a 1987 m, el pH del suelo aumentó hasta un intervalo entre 8.2 y 7.4. Las variables presentaron correlación significativa $r = -0.40$.

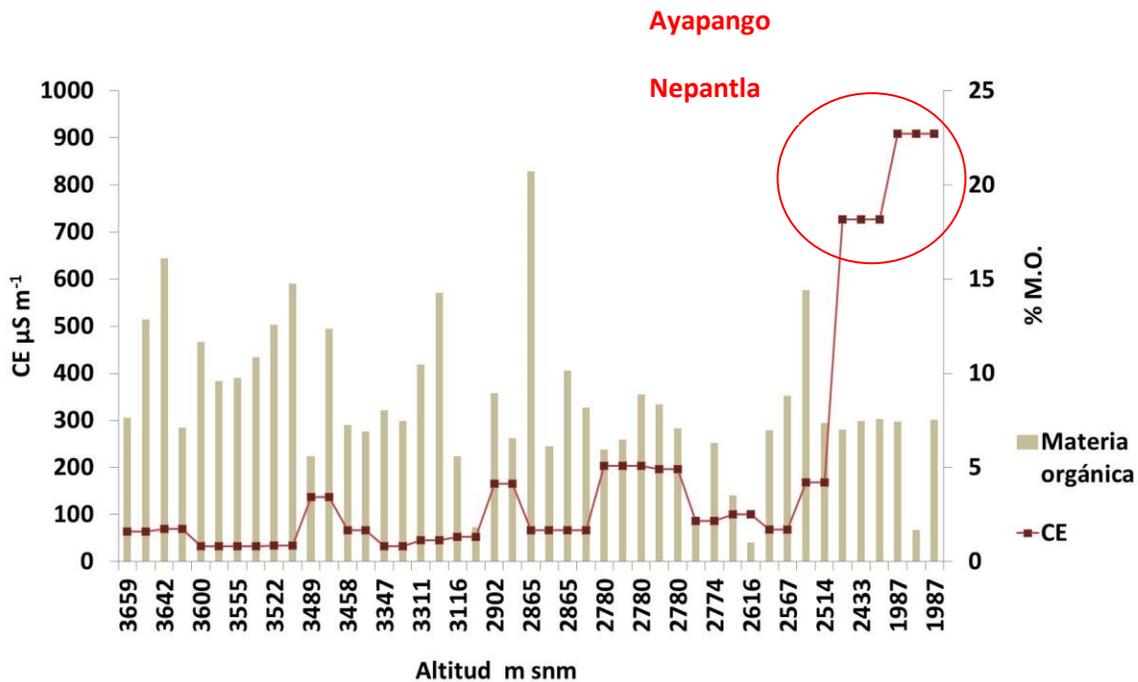


Figura 23. Relación entre materia orgánica y conductividad eléctrica a través del gradiente altitudinal.

La estructura y la materia orgánica en el suelo son factores importantes en la retención de iones y sales que se transportan del sistema edáfico al acuático. Como se muestra en la figura

23 existe una relación entre la materia orgánica y la conductividad eléctrica en el agua, con base en el análisis de correlación múltiple se obtuvo correlación significativa en las localidades de mayor impacto en donde el porcentaje de materia orgánica es bajo la conductividad eléctrica se dispara hasta valores por arriba de los 900 μS , esto se registró particularmente en zonas urbanas por debajo de los 2514 m. En localidades en donde se registraron mayores porcentajes de materia orgánica la conductividad eléctrica se mantuvo por debajo de los 100 μS , particularmente en localidades de mayor altitud y uso de suelo forestal. Se observa una relación inversa entre materia orgánica y la conductividad eléctrica del agua a través del gradiente altitudinal.

Julca, *et al*, (2006) reportaron, que la materia orgánica del suelo contiene cerca del 5 % del nitrógeno total, pero también contiene otros elementos esenciales para las plantas, tales como fósforo, magnesio, calcio, azufre y micronutrientes los cuales están estrechamente relacionados. La materia orgánica tiene un efecto sobre las propiedades físicas del suelo, formando agregados y dando estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas y formando un complejo de cambio que favorece la penetración del agua y el intercambio gaseoso y, disminuyendo la erosión. Cuando se refiere al efecto sobre las propiedades químicas del suelo aumenta la capacidad de cambio de suelo, la reserva de nutrimentos para la vida vegetal, facilita la absorción de minerales, favorece el proceso de mineralización y el desarrollo de la cobertura vegetal. También facilita los mecanismos de absorción de sustancias peligrosas como sales y plaguicidas. Para Julca *et al* (2006), las prácticas de manejo de cultivo pueden tener un efecto sobre los parámetros del suelo, como el pH, textura, color y nutrimentos.

El nitrógeno total presentó correlación significativa con la conductividad eléctrica en el suelo de $r = 0.45$, siendo Nexcolango la localidad con mayor conductividad con $0.30 \mu\text{S m}^{-1}$ y mayor porcentaje de nitrógeno total con 0.62 %.

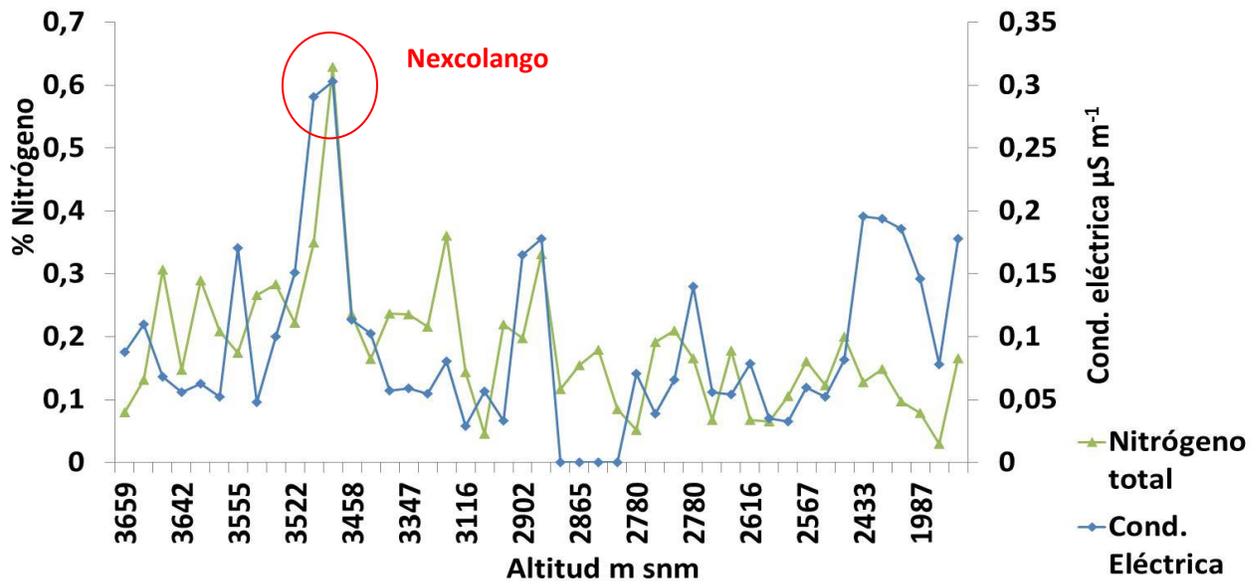


Figura 24. Relación entre conductividad eléctrica del suelo y nitrógeno total a través del gradiente altitudinal.

El nitrógeno total presentó correlación significativa ($p < 0.05$) con caudal de $r = 0.36$ y con el porcentaje de humedad en el suelo con $r = 0.40$ y se observa en la figura 25 y 26.

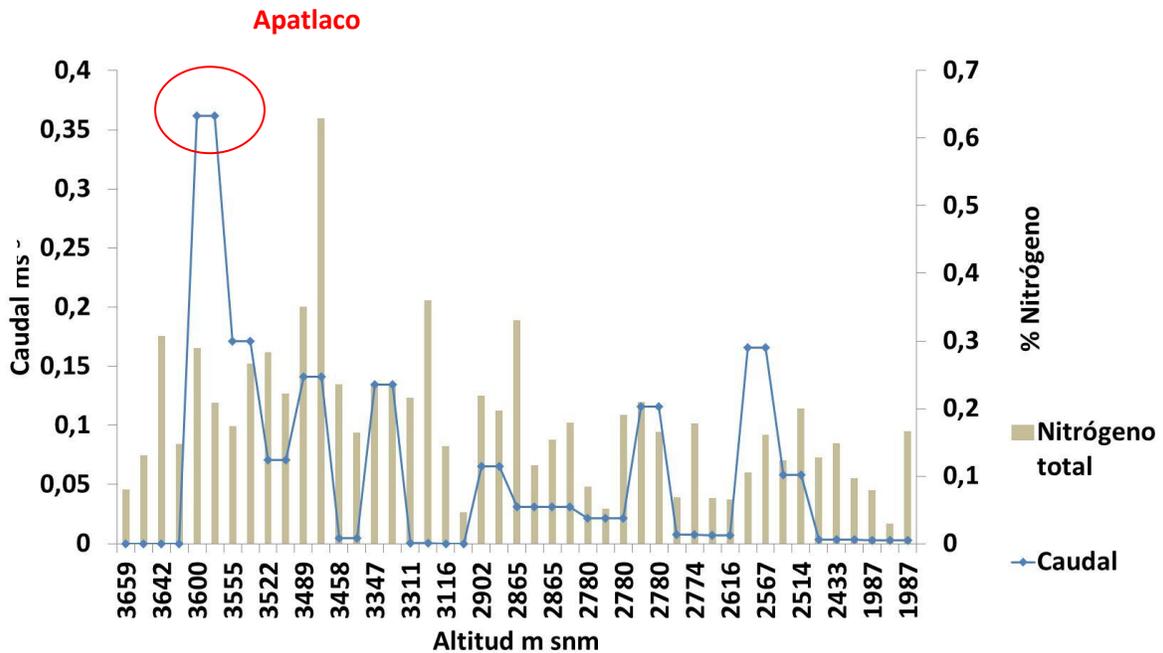


Figura 25. Relación entre caudal y nitrógeno total a través del gradiente altitudinal.

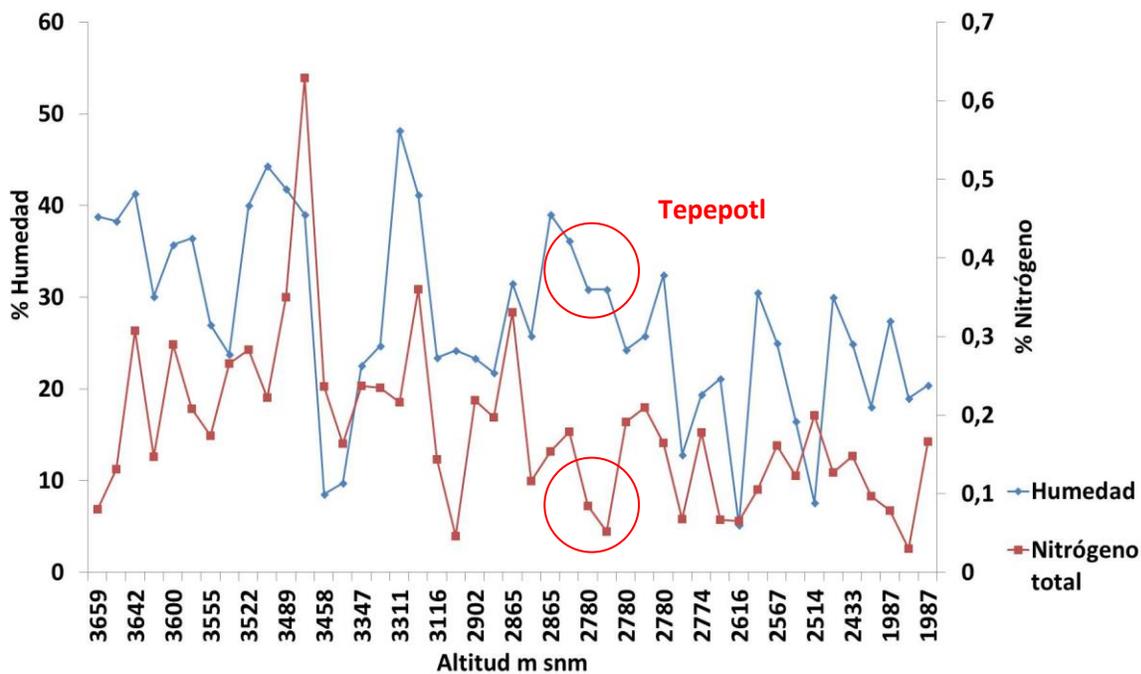


Figura 26. Relación entre humedad y nitrógeno total a través del gradiente altitudinal.

En la localidad de Apatlaco figura 25, se registró el mayor volumen en caudal, se obtuvieron $0.36 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$, con un porcentaje de nitrógeno total de 0.20 % siendo una zona recreativa. Según Zapata, (2005) una de las variables que orienta la ecología en todas las zonas del río (rápidos y zonas de deposición) es la velocidad de la corriente y el caudal, estos factores producen complejos modelos espaciales y temporales de algunos nutrimentos, su efecto es antagónico al ser un factor positivo para la toma de nutrimentos y negativo por el desprendimiento y estrés que genera, con base en esto se puede explicar el comportamiento que se da entre el caudal y la concentración de nitrógeno total presente en el suelo, en Ayapango el caudal es alto y el nitrógeno total tiende a disminuir. El aumento del caudal en una crecida generó el arrastre de la capa superficial del suelo llevándose consigo gran parte de la materia orgánica y nutrimentos.

Existe una relación directa a través del gradiente altitudinal entre el caudal y el porcentaje de humedad y el nitrógeno total. En Tepepotl el comportamiento es inverso, el porcentaje de humedad aumenta y el nitrógeno total tiende a disminuir figura 26, esto se debe a que es una zona recreativa dedicada a la acuacultura, pobre en materia orgánica. La liberación del nitrógeno de la descomposición de la materia orgánica es la fuente más importante en suelos no fertilizados.

Zapata (2005) menciona que existen otros factores que generan la disminución de nitrógeno en el suelo, como erosión, tipo de vegetación y uso de suelo. Grandes cambios en el contenido de humedad de los suelos constituyen un factor ambiental que causa un efecto importante en la descomposición de la materia orgánica y por lo tanto en la mineralización del nitrógeno en el suelo. Como se observa en la figura 26, se registró un comportamiento similar al reportado por Cabrera (2007), considerando que en aquellas localidades menos perturbadas o con uso de suelo forestal se presentó un mayor porcentaje en humedad y materia orgánica, lo cual generó mayor porcentaje de nitrógeno total como en las localidades que se encuentran de los 3600 a los 2780 m (figura 26).

El porcentaje de humedad presenta una relación directa con la materia orgánica y el nitrógeno total del suelo a lo largo del gradiente altitudinal y tienden a disminuir en las localidades de menor altitud. Según Cabrera (2007), reportó la importancia de la interacción entre la materia orgánica y el porcentaje de humedad en la descomposición y mineralización de nitrógeno, encontró que los efectos de temperatura y el porcentaje de humedad sobre la descomposición y la mineralización del nitrógeno a partir de la materia orgánica del suelo fueron diferentes, en suelos en donde el porcentaje humedad y materia orgánica disminuían, la mineralización del nitrógeno disminuía considerablemente, esto se debió a que la descomposición de la materia orgánica es llevada a cabo por bacterias, mientras que la descomposición de los residuos en la superficie es realizada por hongos los cuales operan en niveles de humedad diferentes con respecto a las bacterias.

Fósforo

En la figura 27, 28 y 19 se observa la relación entre fósforo total, ortofosfatos, fósforo extractable y materia orgánica a través del gradiente altitudinal.

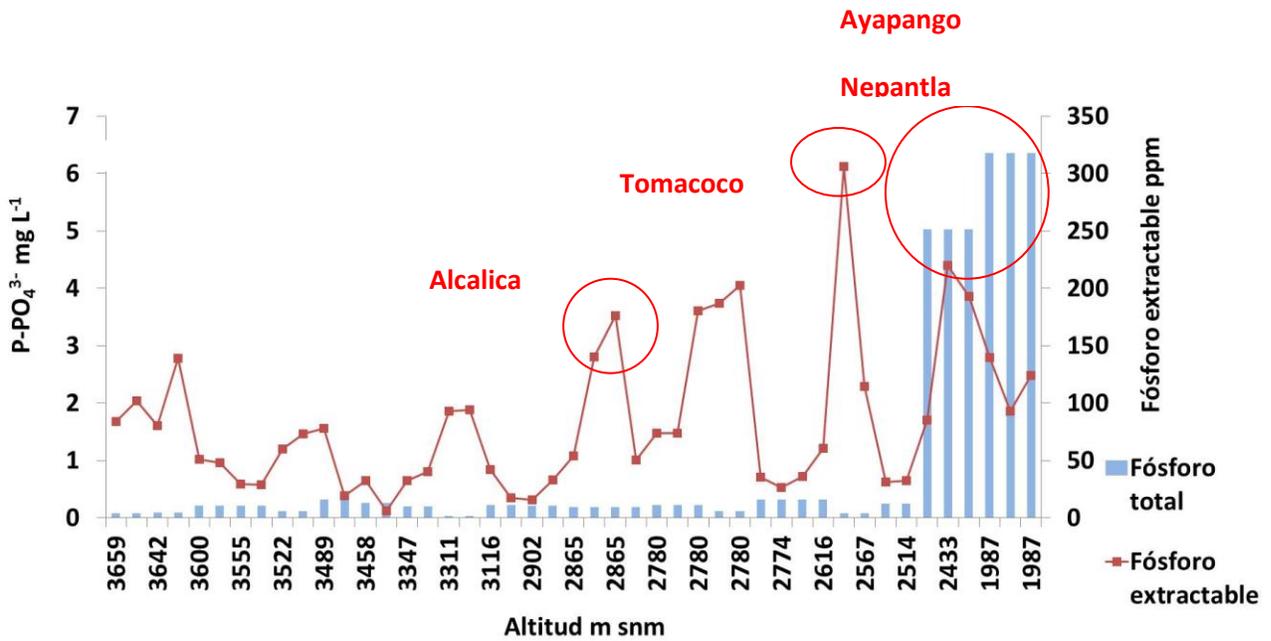


Figura 27. Comportamiento del fósforo a través del gradiente altitudinal.

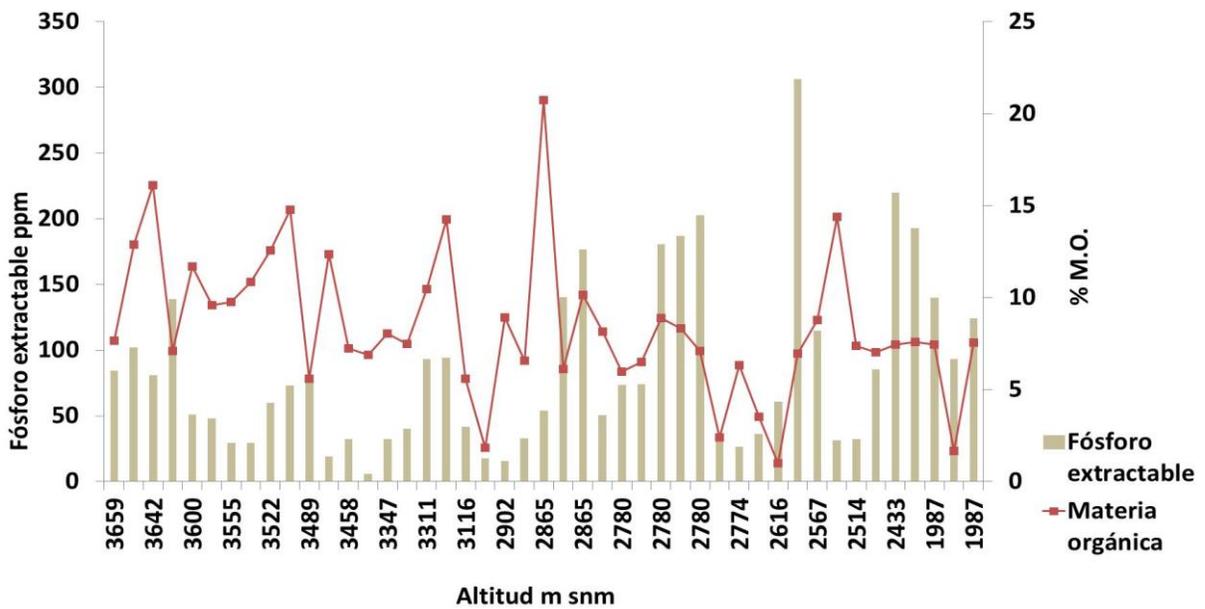


Figura 28. Relación entre fósforo extractable y materia orgánica a través del gradiente altitudinal.

Como se observa en la Figura 27, se encontraron concentraciones bajas de fósforo total en el agua en las localidades de mayor altitud, con valores de 0.3 a 0.9 mgL⁻¹. En general las concentraciones de fósforo total se mantuvieron por debajo de los 0.3 mgL⁻¹ en la mayoría de las localidades que se encuentran a 3659–2514 m.

La cantidad de fósforo que entra a formar parte del sistema de arroyos y ríos depende de la cantidad de fósforo en el suelo, la cobertura vegetal, el uso de tierra y el uso de fertilizante en el aprovechamiento agrícola provoca un aumento considerable en dichos valores. Se registraron las más altas de fósforo total en Ayapango con 5 mgL⁻¹ y Nepantla con 6.3 mgL⁻¹, este aumento en la concentración se debe al aporte de aguas residuales y domésticas que llegan directamente al sistema sin ser tratadas anteriormente y que son ricas en compuestos fosfatados.

Las mayores concentraciones de fósforo extractable en el suelo se registraron en localidades forestales, Nexcolango, Tierra amarilla y Alcalica con 77.9, 94.2 y 176.5 ppm.

Tomacoco presentó la mayor concentración de fósforo extractable, siendo una localidad dedicada a la agricultura se registraron valores de 306.13 ppm resultado de las practicas de fertilización a las que se somete el suelo para fines agrícolas. En la figura 27, se observa que el fósforo en los sitios forestales es retenido en el suelo y no es arrastrado hacia el sistema acuático, en las localidades recreativas o dedicadas a la agricultura la concentración de fósforo total aumentó en agua y disminuye en el suelo siendo inverso el comportamiento de fósforo en estas localidades con una correlación significativa.

Según Astudillo (2006), la concentración requerida del P en el suelo depende primariamente de las especies vegetales, además de las diferentes fuentes del elemento y de la capacidad de fijación de este en el suelo. Aunque en general los suelos agrícolas contienen buenas reservas de fósforo como consecuencia de la aplicación regular de fertilizantes, su disponibilidad para la planta es escasa debido a los procesos químicos que “fijan” el P soluble de los fertilizantes en formas insolubles no aptas para la nutrición. El fósforo en suelos forestales es proporcionado principalmente por la materia orgánica del suelo.

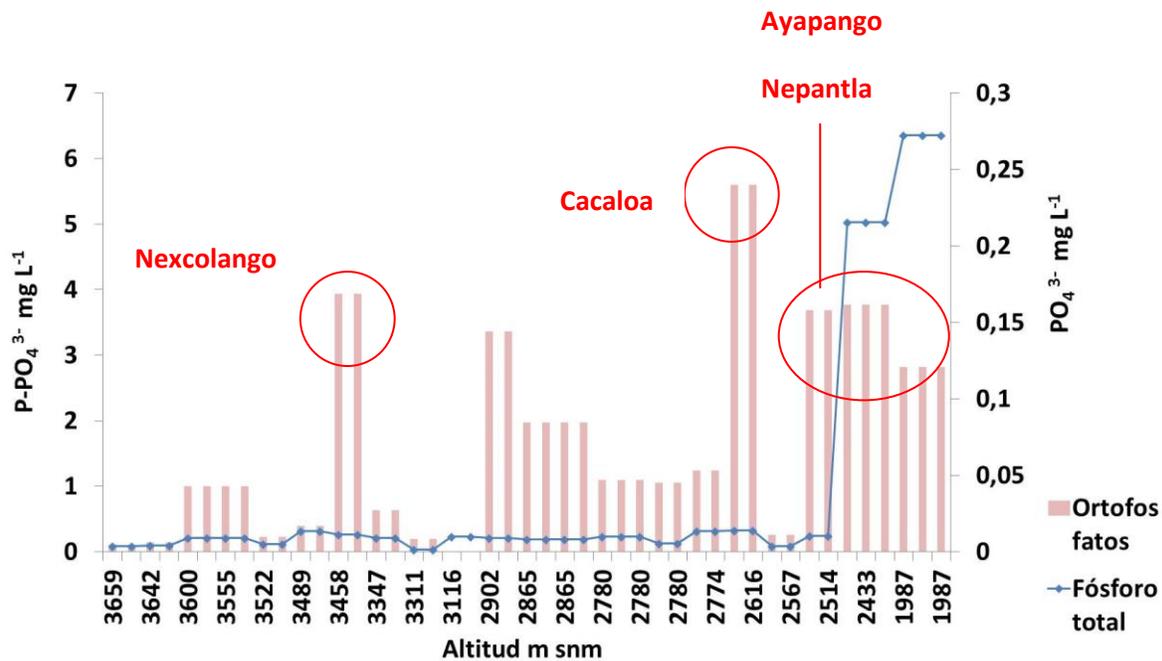


Figura 29. Comportamiento de fósforo en agua a través del gradiente altitudinal.

En cuanto a la concentración de los ortofosfatos siguió el mismo comportamiento en la mayoría de las localidades con el fósforo total, figura 29. Se observa que en aquellos sitios dedicados a la agricultura disminuye hasta obtener 0.08 mgL⁻¹, esto se debe principalmente a su consumo o extracción incorporada al suelo de los cultivos. En Ayapango y Nepantla la concentración de ortofosfatos aumentó hasta obtener 0.16 y 0.12 mgL⁻¹, a consecuencia del aporte directo de desechos domésticos ricos en fósforo y fosfatos. En las localidades forestales se registró la menor concentración de ortofosfatos de 0.004 a 0.009 mgL⁻¹ con una correlación baja= 0.40, sin embargo, significativa ($p < 0.05$).

Se muestra la relación entre fósforo total, dureza, conductividad eléctrica y alcalinidad en agua a través del gradiente altitudinal y se muestran en las figuras 30, 31 y 32.

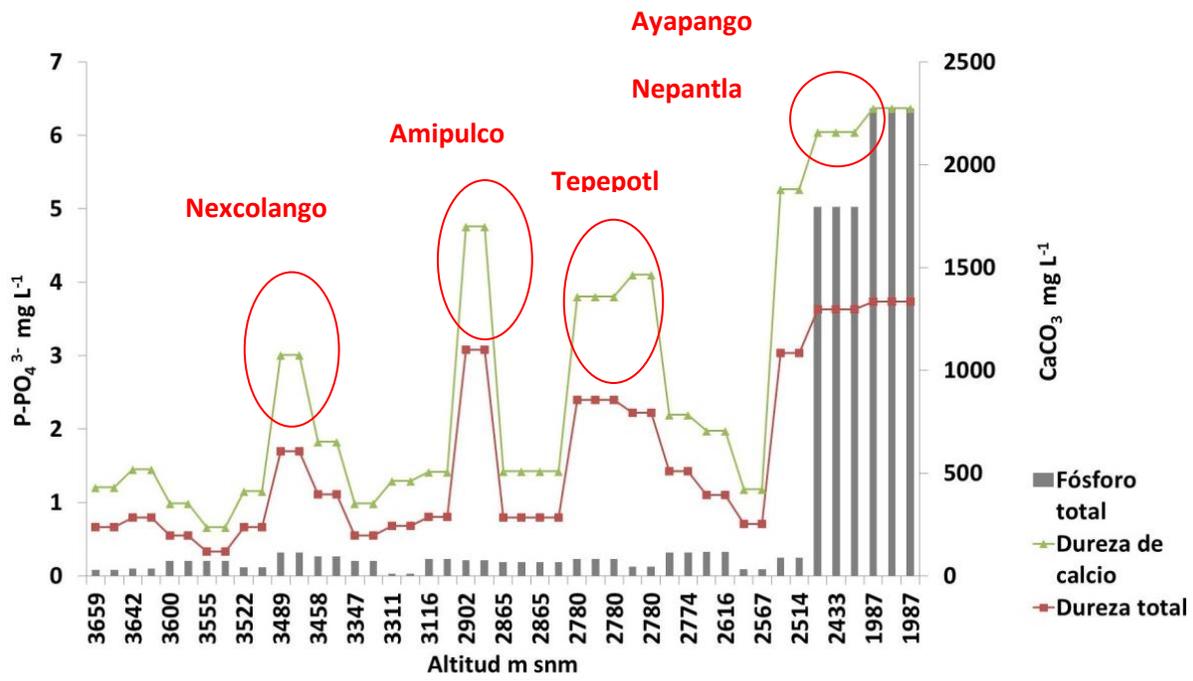


Figura 30. Relación de fósforo total, dureza de calcio y total a través del gradiente altitudinal.

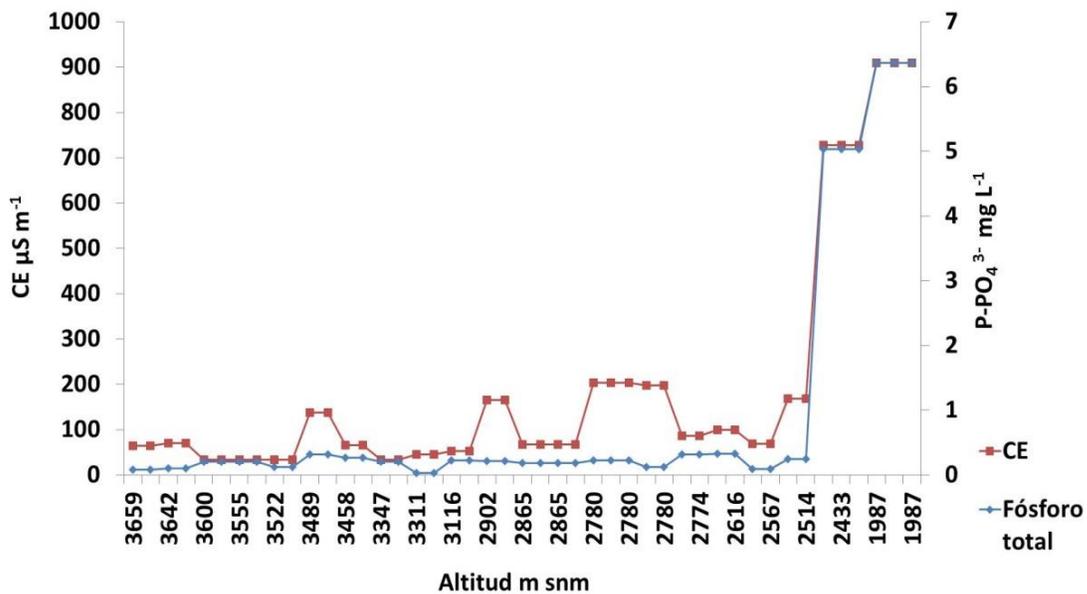


Figura 31. Relación de fósforo total y conductividad eléctrica a través del gradiente altitudinal.

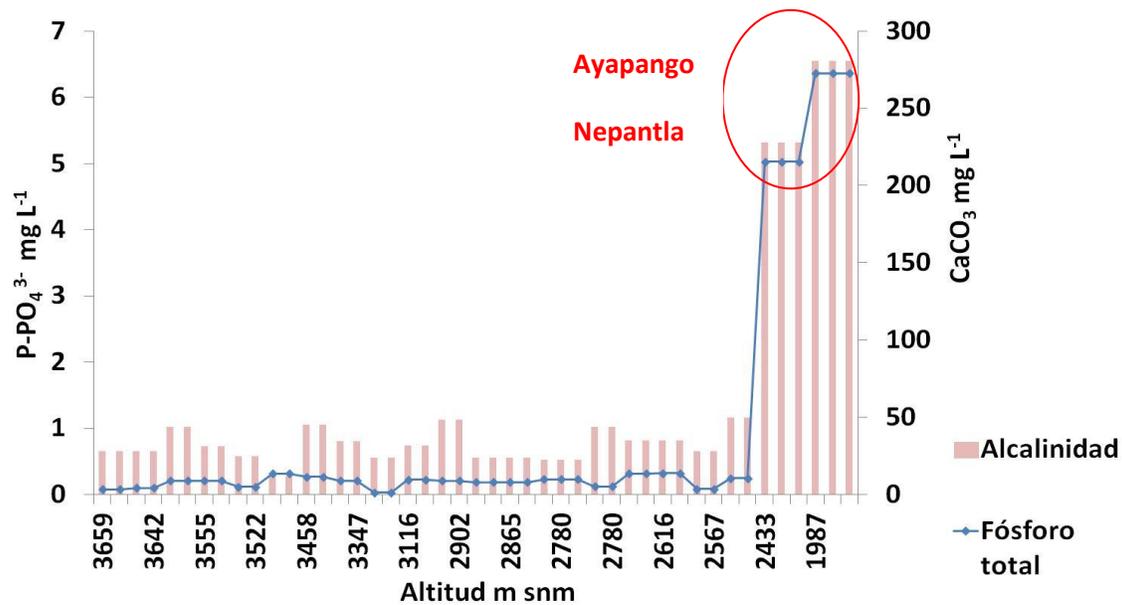


Figura 32 Relación de fósforo total y alcalinidad a través del gradiente altitudinal.

Fósforo total presentó correlación significativa con las siguientes variables: dureza total de $r= 0.73$, dureza de calcio de $r= 0.75$, alcalinidad de $r= 0.52$ y con la conductividad eléctrica con $r= 0.97$. Es evidente que la entrada de sales como carbonato de calcio y magnesio repercute y se refleja en la conductividad eléctrica del agua, como se observa en la figura 30, 31 y 32 Nexcolango, Amipulco y Tepepotl presentaron un aumento de estas variables. Sin embargo, las concentraciones más altas se registraron en las localidades de menor altitud Ayapango con 863.26 y 1294.89 $\text{mgCaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ para dureza de calcio y total y 228 $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ para alcalinidad, por otra parte Nepantla con 941.74 y 1334.13 mgL^{-1} de CaCO_3 para dureza de calcio y total y 280 $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ para alcalinidad, se registró la mayor conductividad eléctrica con 727 y 909 μS . Es importante establecer que la dureza y la conductividad eléctrica del agua esta ligada al fósforo total en el sistema.

La figura gráfica 33 y 34 muestran el comportamiento temperatura del suelo, pH real y fósforo total.

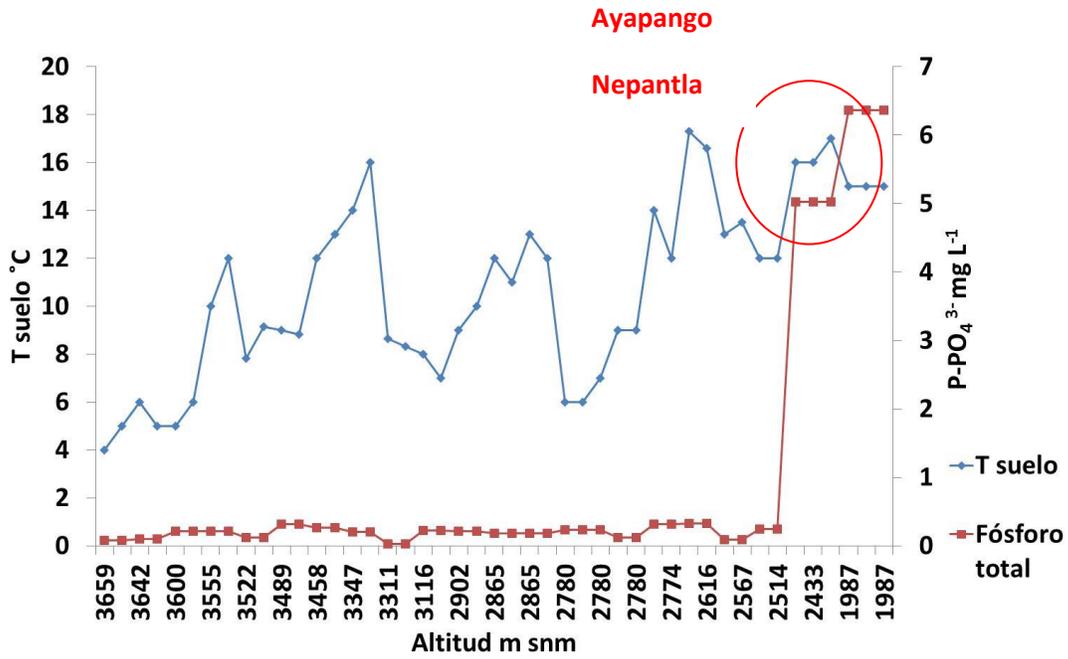


Figura 33. Relación de fósforo total y temperatura del suelo a través del gradiente altitudinal

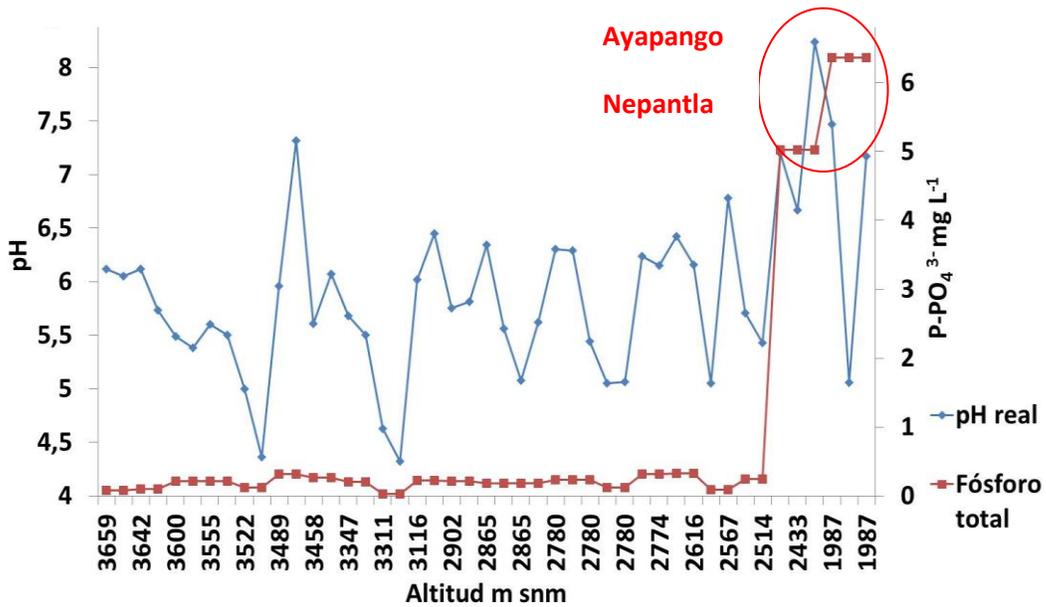


Figura 34. Relación de fósforo total, pH real y potencial a través del gradiente altitudinal

El fósforo total presentó correlación significativa con temperatura del suelo de $r= 0.41$ y pH potencial de $r= 0.33$, es importante mencionar que la disponibilidad del fósforo depende de la temperatura y del pH del suelo. Como se observa en las figuras 33 y 34, la mayor concentración de fósforo total se encuentra en las localidades urbanas Ayapango y Nepantla, el pH real en estas localidades fue de 8.2 y 7.4 con temperaturas de 17 y 15 °C; parte del fósforo y los fosfatos que se encuentran en aguas residuales de desechos domésticos son incorporados directamente al caudal, sin ser tratados con anticipación, incrementando la concentración de nutrientes.

En suelos dedicados a la agricultura y actividades pecuarias, los fosfatos que no son utilizados por la vegetación son arrastrados hacia el caudal si las condiciones son favorables como la erosión, el mal uso de fertilizantes y el aporte directo de desechos domésticos, esto genera un aumento en la concentración en el agua.

Según Donahue *et al* (1977), el fósforo del suelo es fijado y está menos disponible por la formación de fosfatos menos solubles de hierro, aluminio y calcio. En un suelo de pH bajo 5.5 (ácido) tanto el hierro y el aluminio fijarán fósforo. A un pH bajo 7.0 (alcalino) el calcio fija fósforo, la máxima disponibilidad de fósforo es a pH 6.5 en suelos minerales o 5.5 en suelos orgánicos, a suelos con pH 8.0 o más aumentará la disponibilidad de fósforo para los cultivos. Es importante mencionar que la mayor concentración de fósforo total se encontró en localidades con pH cercanos a 8.0 lo cual indica el aporte y disponibilidad de fósforo.

En la figura 36, 37 y 38 se observa el comportamiento del oxígeno disuelto, DBO₅ y DQO.

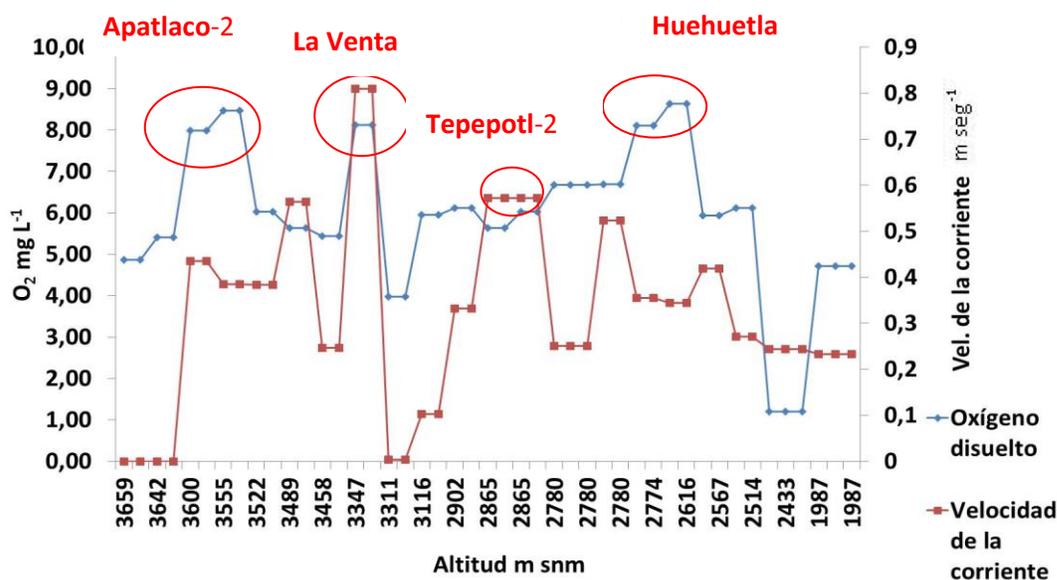


Figura 36. Relación entre oxígeno disuelto y velocidad de la corriente a través del gradiente altitudinal.

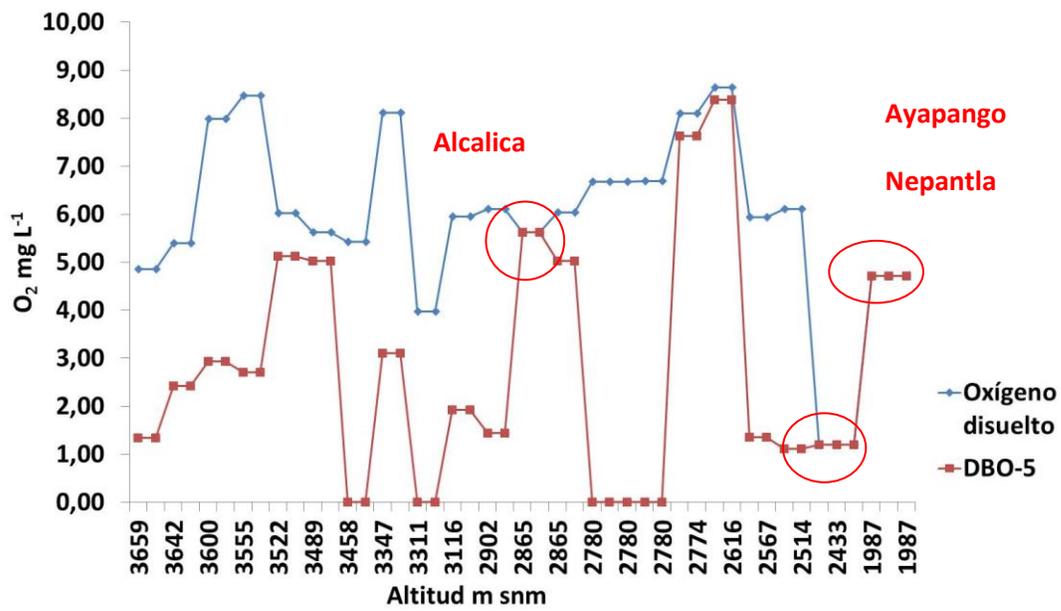


Figura 37. Relación entre oxígeno disuelto y DBO₅ a través del gradiente altitudinal.

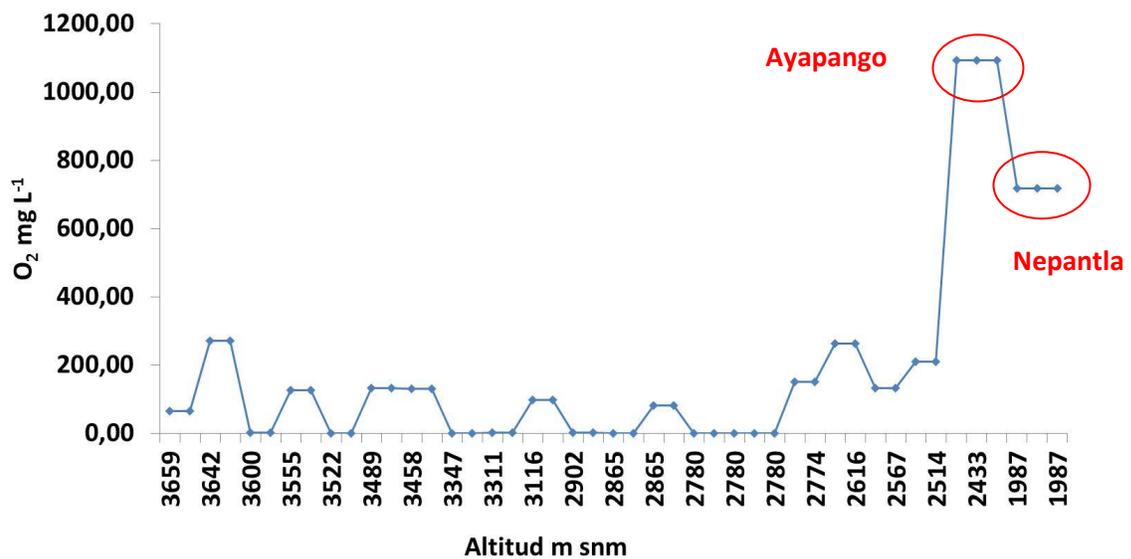


Figura 38. Comportamiento de DQO a través del gradiente altitudinal.

El oxígeno puede producirse por la acción fotosintética de las algas durante el día o ser capturado de la atmósfera, pero se pierde durante la noche cuando es consumido para llevar a cabo procesos metabólicos o la degradación de la materia orgánica. En la figura 36 puede observarse la relación que existe entre la velocidad de la corriente y el oxígeno disuelto, los valores de oxígeno están relacionados con el movimiento y la temperatura del arroyo, la turbulencia también puede aumentar los niveles debido a que el aire que queda atrapado bajo el agua, se mueve rápidamente y aporte oxígeno al sistema.

Las mayores concentraciones de oxígeno se registraron en la localidad de Huehuetla con 8.64 mgL^{-1} a una altitud de 2616 m, con un uso de suelo forestal. El oxígeno disminuye en las localidades de menor altitud, la temperatura es un factor importante ya que la solubilidad del oxígeno disminuye al aumentar ésta y se refleja en las localidades urbanas, es importante mencionar que no en todas sigue el mismo comportamiento. En algunas localidades cuando la velocidad de la corriente aumenta, la concentración de oxígeno también. En sitios como Ayapango y Nepantla, los niveles de oxígeno disminuyen a 1.2 y 4.72 mgL^{-1} el oxígeno que se genera por la solubilidad del aire es consumido por los microorganismos, la temperatura elevada en estos puntos propicia el aumento de las reacciones metabólicas para degradar la materia orgánica.

Las concentraciones más altas se tomaron en las localidades de mayor movimiento por lo accidentado del terreno, se presentaron temperaturas bajas con valores de 4 a 8.64 mgL^{-1} .

Apatlaco-2, Tepepotl-2 y La Venta, son localidades dedicadas a la acuicultura y sin embargo presentaron 7.98 , 6.69 y 8.12 mgL^{-1} esto se debe a que el agua es llevada a un proceso de oxigenación para el metabolismo de los organismos. Valbuena (2006), determinó que el efecto de la temperatura y el consumo del oxígeno es directamente proporcional, es decir a mayor temperatura del agua presentó mayor consumo de oxígeno, además concluye que la solubilidad de oxígeno disminuye a medida que la temperatura del agua aumenta.

La demanda de oxígeno DBO_5 es una medida de la cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitan para oxidar la materia orgánica presente en la muestra de agua. En la figura 37 se observa el comportamiento que tiene el oxígeno, tiende a disminuir en todas las localidades y fue consumido por los microorganismos para degradar la materia orgánica así como la oxidación y mineralización de compuestos como sulfatos, nitratos, entre otros.

La demanda de oxígeno a los 5 días muestra que en algunas localidades esta es muy alta: Alcalica, Ayapango y Nepantla. Ayapango registró la menor concentración de oxígeno disuelto, disminuye de manera drástica resultado de aportes de líquidos residuales urbanos con ingreso de mayor cantidad de materia orgánica al sistema, como consecuencia de lo

anterior y del poco movimiento el oxígeno disuelto, son concentraciones bajas. En base a la clasificación de la CONAGUA la DBO₅ se encuentran en aguas de buena calidad “aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable”.

Se entiende por demanda química de oxígeno (DQO) la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada. En la figura 38, se observa que la mayor demanda química de oxígeno se registró en Ayapango y Nepantla con 1092.09 y 718.63 mg O₂ L⁻¹, en donde gran cantidad de materia orgánica es arrastrada al sistema. Según la clasificación de CONAGUA, de acuerdo a la DQO el agua en estas localidades está fuertemente contaminada “aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de agua residuales, crudas, municipales y ni municipales. [Disponible en línea]: <http://www.cna.gob.mx> [fecha de consulta 25 marzo, 2013].

En Tomacoco los arroyos son utilizados como descargas de compuestos orgánicos e inorgánicos donde se registraron valores de DQO de 132.57 mg O₂ L⁻¹, esta zona se caracteriza por tener fines agropecuarios, en donde el abono que es generado por algunos animales es arrastrado al sistema incrementando la cantidad de desechos orgánicos, aunado a esto el uso de fertilizantes y pesticidas son utilizados con frecuencia para la producción de algunas cosechas. En las localidades que se encuentran por arriba de los 3300 m se registraron valores bajos indicando la buena calidad del agua, figura 38. Según Pérez *et al* (2004) los niveles altos de contaminación orgánica en sistemas continentales se manifiesta en las altas concentraciones de NO₃⁻, NH₄⁺, coliformes fecales y un mayor nivel de la DQO.

Hidalgo (2003), menciona que uno de los principales problemas de contaminación en sistemas continentales es la actividad industrial y niveles altos de vertido de efluentes en zonas urbanas, dos factores que indican una severa contaminación de origen orgánico. Los sistemas que reciben descargas cloacales y aguas residuales provenientes de las industrias y viviendas conducen a una concentración alta de materia orgánica elevando la demanda química de oxígeno y provocando la contaminación del sistema.

Montalvo *et al* (2008), reportó, a consecuencia del vertimiento de aguas residuales de aguas residuales de diferente naturaleza con escaso o ningún tratamiento en zonas de desarrollo aumenta la demanda química de oxígeno, la cual es un indicador de la contaminación del sistema. Las mayores cargas de DQO no siempre guardan una estrecha relación con la DBO₅.

COMPONENTES PRINCIPALES

Se utilizó un análisis de componentes principales para detectar cuales son las propiedades físicas y químicas del agua y suelo más importantes en la caracterización de los sistemas ribereños. Se seleccionaron las variables con coeficientes de correlación mayores a ($r= 0.5$) en el análisis de correlación múltiple con el objetivo de elegir las de mayor relación en el sistema. Las variables con correlación más alta en suelo y agua fueron, altitud, caudal, velocidad de la corriente, temperatura del suelo, temperatura ambiente, porcentaje de humedad, porcentaje de limo y arcilla, pH potencial y real, conductividad eléctrica (suelo), materia orgánica (MO), nitratos $N-NO_3^-$, amonio $N-NH_4^+$, pH (agua), ortofosfatos, conductividad eléctrica (agua), fósforo total (FT), dureza de calcio, oxígeno disuelto y demanda química de oxígeno (DQO). El propósito del análisis fue obtener un número reducido de combinaciones lineales entre 21 variables que explique en la mayor medida la variabilidad de los datos. Se obtuvieron 6 componentes con eigenvalores mayores o iguales que 1.0 que explica 79.42% de la variabilidad de los datos originales y se indica en los cuadros 5 y 6.

Cuadro 5. Análisis de los componentes principales.

<i>Componente Número</i>	<i>Eigenvalor</i>	<i>Porcentaje de Varianza</i>	<i>Porcentaje Acumulado</i>
1	7.9244	37.735	37.735
2	2.64651	12.602	50.338
3	1.89539	9.026	59.363
4	1.45097	6.909	66.273
5	1.19794	5.704	71.977
6	1.14396	5.447	79.425
7	0.973227	4.634	82.059
8	0.774798	3.690	85.749

Cuadro 6. Pesos de los componentes.

Variable	Componente1	Componente2	Componente3	Componente4	Componente5	Componente6
Altitud	0.298232	-0.1157	0.0953306	-0.171549	0.0299885	0.0404777
Caudal	0.138856	0.0396692	0.511884	0.165614	0.113528	-0.0591337
Velocidad	0.0387986	0.216055	0.449066	0.479738	0.011802	0.196688
Temp. Suelo	-0.26001	0.187068	0.146633	0.116163	0.0864227	0.222743
Temp. Ambiente	-0.255601	0.0412479	-0.215993	0.0106952	0.00893543	0.130224
Humedad	0.20013	-0.417038	-0.0563192	0.190879	0.0332232	0.0141827
Arcilla	0.0195467	-0.268894	0.188052	0.216684	-0.556895	0.151045
Limo	0.0119967	-0.125502	0.102279	-0.122346	-0.52459	-0.239524
pH real	-0.216189	-0.115339	-0.0106279	0.0868784	-0.0498975	0.370702
pH potencial	-0.278893	0.135721	-0.120086	0.0523484	-0.145765	0.312802
Conductividad	-0.102129	-0.364055	0.283261	-0.0664545	0.112324	0.332336
Materia Orgánica	0.152888	-0.227052	0.0199815	0.0397341	0.537043	0.143065
Nitratos	-0.311434	-0.162999	0.0391759	-0.00648939	-0.0170093	-0.00728206
Amonio	-0.296924	-0.235472	0.00282072	-0.0448329	0.15816	-0.110628
pH	-0.16955	0.34787	0.277727	0.0728453	0.0104409	-0.337786
Ortofosfatos	-0.256902	0.214638	0.0355906	-0.0569416	0.155905	-0.10879
CE agua	-0.309589	-0.228922	0.0230584	0.0958609	0.0285467	-0.194578
Fósforo Total	-0.302218	-0.242943	0.0368608	0.101885	0.0513872	-0.169987
Dureza calcio	-0.28467	-0.12995	0.0478512	0.0296974	0.035287	-0.188348
Oxígeno	-0.0891825	0.160854	0.161605	-0.54877	-0.0979668	0.418733
DQO	0.0485787	0.143498	-0.452402	0.50254	-0.0575078	0.165058

El primer componente indica que la mayor parte de las variables presentan correlación negativa y se dirigen hacia la entrada de sales al agua con los siguientes parámetros: nitratos (N-NO_3^-), amonio (N-NH_4^+), ortofosfatos, conductividad eléctrica (CE), fósforo total (FT) y dureza de calcio, nos muestra que todas las variables presentan una relación significativa exponiendo en que condiciones se encuentra el sistema acuático y la relación con el pH potencial y real ya que presentaron el mismo comportamiento, estas variables presentaron una relación inversa con la altitud y el porcentaje de humedad como se muestra en la figura 39.

Ayala (2011), encontró una relación significativa con el fósforo total, los ortofosfatos, la alcalinidad, las durezas y la DQO y concluyó que estos parámetros aumentan al disminuir la altitud, esto implica que el sistema se está comportando de manera similar en otras localidades y los parámetros que se encuentran relacionados al agua son indicios de que el sistema se dirige hacia el proceso de contaminación o eutrofización particularmente en aquellas localidades de menor altitud. Los arroyos están sujetos al deterioro tanto por las obras que se desarrollan en los sistemas acuáticos que provocan modificaciones en el ambiente por actividades que se realizan en zonas terrestres cercanas al caudal como la agricultura, la deforestación, el pastoreo y el desarrollo industrial y urbano, se debe tener en cuenta que dado el carácter dinámico de los ambientes lóticos pueden ser contaminados alterando las concentraciones de nitratos, amonio, fósforo total que entran al sistema (Leal, 2005)

En cuanto al componente número 2, éste refleja la importancia que presenta la estructura del suelo al aporte de nutrimentos como amonio N-NH_4^+ y fósforo total al agua la cual se ve reflejada en los valores de la conductividad eléctrica ya que presentaron una correlación

negativa en cuanto al porcentaje de humedad, arcilla y materia orgánica, en este caso presentaron una relación inversa con la velocidad de la corriente el pH y los ortofosfatos.

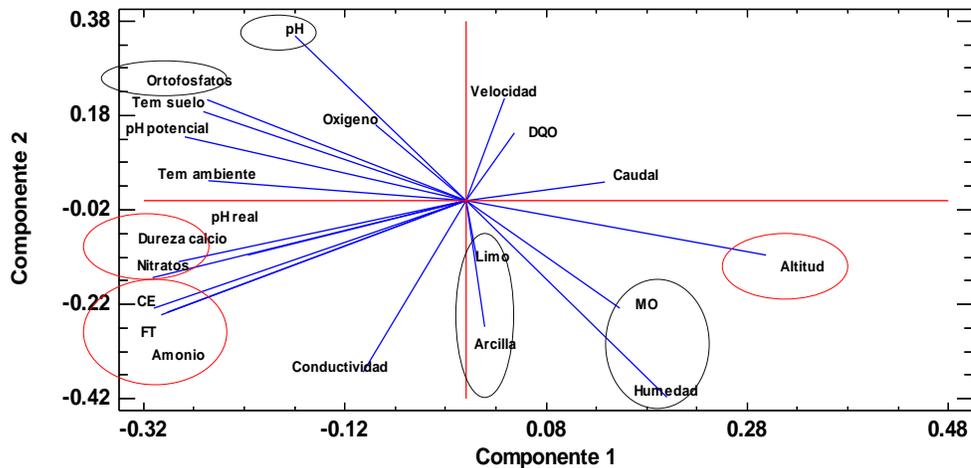


Figura 39. Gráfica pesos de los componentes 1 y 2

De acuerdo al componente número 3 (figura 40), presentan una correlación positiva el caudal, velocidad de la corriente y la conductividad eléctrica presentando una relación inversa con la demanda química de oxígeno (DQO), esto muestra que el arrastre de materia orgánica y sales está presente con el aumento del nivel del agua en el caudal. El proceso de oxidación de materia orgánica y otros compuestos se refleja en el consumo de oxígeno de la DQO, es evidente que el oxígeno está siendo utilizado para la oxidación de nitratos $N-NO_3^-$, sulfatos SO_4^{-2} , etc.

En cuanto al componente 4 el oxígeno se ve reducido con el aumento de los valores de DQO como se observa en la figura 40, la demanda química de oxígeno es un parámetro que indica la contaminación del sistema, existe una correlación significativa entre estos dos parámetros lo cual indica la buena calidad del agua o la contaminación de la misma. La velocidad de la corriente y la DQO presentaron una asociación directa con el porcentaje de arcilla en el suelo. El proceso de eutrofización determinado en el componente número 1 se ve reflejado en la correlación inversa del oxígeno con la DQO del componente 4 indicando las menores concentraciones de oxígeno en las localidades urbanas.

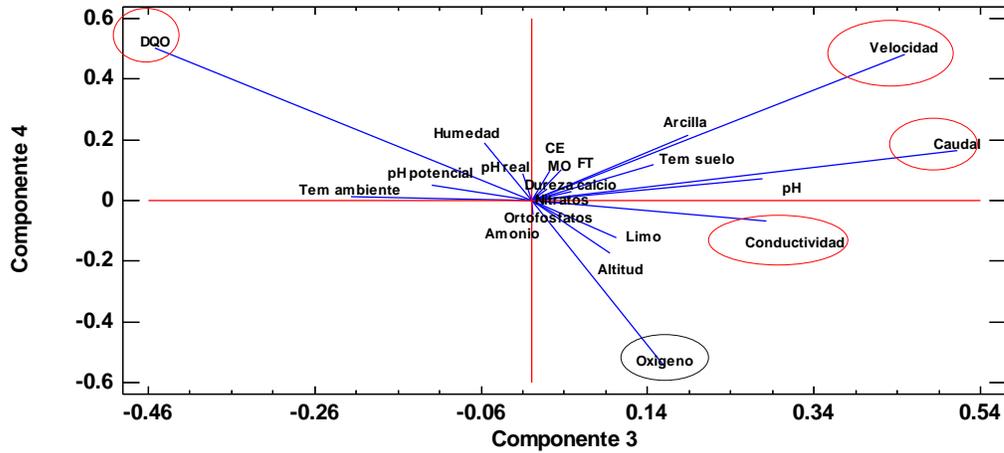


Figura 40. Gráfica pesos de los componentes 3 y 4.

El componente número 5 está representado por la textura del suelo en cuanto a su composición de limo y arcilla, estos parámetros muestran una relación inversa con la materia orgánica, esto indica la degradación o la perturbación del suelo. Existe una relación significativa muy alta en cuanto a la degradación del suelo, es importante mencionar que al disminuir la materia orgánica la compactación del suelo es mayor generando que la estructura del suelo se modifique provocando mayor cantidad de limo y arcilla, esto se refleja a lo largo del gradiente altitudinal perdiendo gran cantidad de materia orgánica en las localidades de menor altitud y aumentando la degradación y erosión del suelo en zonas dedicadas a la agricultura y urbanas.

En el componente 6 se observa que la temperatura del suelo, pH real y potencial tienen una relación directa con oxígeno disuelto ya que la correlación fue alta en estos parámetros,

Cruz (2009), reportó el mismo efecto en ambientes riparios en la posición occidental del PN Izta-Popo, menciona que el pH potencial y real del suelo aumenta conforme existe mayor oxígeno disuelto en el medio acuático al disminuir los ácidos húmicos y al favorecer la oxidación y mineralización de la materia orgánica, la temperatura del suelo es un factor importante ya que a mayor temperatura la degradación de la materia orgánica es mayor como se muestra en la figura 41

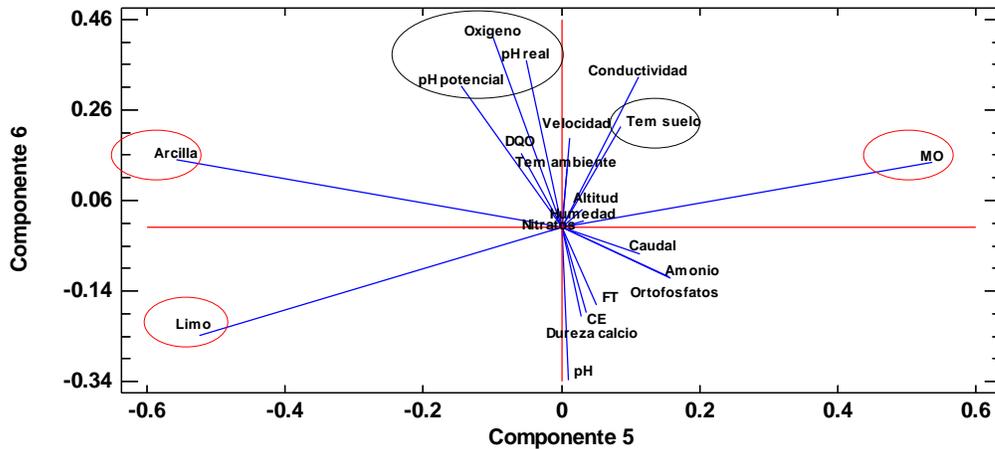


Figura 41. Gráfica pesos de los componentes 5 y 6.

Correlaciones Canónicas

Se realizó un análisis de correlaciones canónicas seleccionando las variables que presentaron mayor peso estadístico en el análisis de componentes principales. Este método nos ayudara a determinar la asociación lineal entre dos grupos de variables de tal manera que la correlación sea máxima.

Las variables seleccionadas para agua y suelo fueron: temperatura del suelo, densidad aparente, porcentaje de humedad, porcentaje de espacio poroso, arcilla, limo, pH potencial y real, conductividad en agua y suelo, materia orgánica, nitratos ($N-NO_3^-$), amonio ($N-NH_4^+$), pH, dureza de calcio, DQO y oxígeno disuelto.

En el cuadro 7 muestra las correlaciones estimadas entre cada conjunto de variables canónicas. Dado que 3 de los valores-P son menores que 0.05, esos conjuntos tienen una correlación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0 %.

Tabla 7. Correlaciones canónicas entre las variables de agua y suelo.

Número	Eigenvalor	Correlación Canónica	Lambda de Wilks	Chi-Cuadrada	G.L.	Valor-P
1	0.942624	0.970888	0.000808613	242.086	90	0.0000
2	0.824236	0.907874	0.0140932	144.91	72	0.0000
3	0.571653	0.756078	0.0801823	85.7974	56	0.0064
4	0.514795	0.717492	0.18719	56.9714	42	0.0614
5	0.389443	0.624053	0.385796	32.3832	30	0.3499

Tabla 8. Coeficientes de Variables Canónicas del Primer Conjunto.

	Coefficiente 1		Coefficiente 2		Coefficiente 3
DA	-0.734253	DA	-0.553576	Temp. Suelo	-0.396956
Humedad	-0.66501	Arcilla	-0.701098	EP	-0.597567
pH potencial	0.295743	pH potencial	-0.225596	pH potencial	0.412966

Tabla 9. Coeficientes de Variables Canónicas del segundo Conjunto.

	Coefficiente 1		Coefficiente 2		Coefficiente 3
Nitratos	0.444322	Nitratos	0.536535	Ortofosfatos	0.605481
Amonio	0.358034	Amonio	0.630076	Fósforo total	-4.77166
pH	0.77684	pH	0.925567	CE	7.17009
Fósforo Total	3.7974	Dureza de calcio	0.799807		
CE	-5.1728	OD	-0.526502		

Las variables que contribuyen de manera más significativa para el primer coeficiente en suelo la densidad aparente y el porcentaje de humedad dirigiéndose hacia el extremo negativo, en el conjunto número 2 en el primer coeficiente se observa que nitratos amonio, pH y fósforo total presentan una relación significativa, estos parámetros se encuentran íntimamente ligados a la contaminación del sistema acuático. Según Flores (2009), la eutrofización y contaminación del agua se refiere al enriquecimiento de nitrógeno (N) y fósforo (P), en México el P total se ha usado como indicador del estado trófico de los cuerpos de agua, por otro lado el N de origen orgánico e inorgánico aplicado al suelo está directamente vinculado con el contenido de nitratos y amonio durante el proceso de lixiviación, contaminando las aguas subterráneas o es transportado directamente hacia las aguas superficiales que se encuentran en contacto con áreas de cultivo.

A través de este análisis se pone de manifiesto la importancia que tienen las variables físicas y químicas del suelo al aporte de sales y nutrimentos al caudal, observándose nuevamente una relación inversa entre la entrada de nutrimentos y la erosión del suelo. Este comportamiento se observa a lo largo del gradiente altitudinal encontrándose las concentraciones más altas de estos parámetros en las localidades de menor altitud o en donde el uso de suelo no es forestal y la degradación del mismo es mayor. El porcentaje de humedad está relacionado fuertemente con el pH potencial, ya que el aumento de un parámetro genera la disminución del otro. Fernández *et al*, en su análisis de correlaciones canónicas aplicadas al estudio de la relación entre la composición físico-química del agua y

suelo aluvial en el río Bernesga (Leon), reportó el mismo comportamiento de los parámetros relacionados con el agua como nitratos, amonio, hierro, cloruros y que es posible que estas variables estén fuertemente relacionadas con el proceso de eutrofia.

En cuanto al coeficiente 2 la densidad aparente, el espacio poroso y el pH potencial presentaron una relación significativa pero inversa nuevamente con los nitratos, amonio, pH y la dureza de calcio, el aumento de estos parámetros propicia la disminución del oxígeno disuelto lo cual indica que la contaminación del agua se general al alterar las propiedades del suelo. De igual manera éste coeficiente muestra la acidez del agua en función con la concentración de contaminantes en el sistema.

Los suelos forestales a diferencia de aquellos dedicados al uso agrícola o ganadero, permiten que las aguas se infiltren en grandes cantidades, el cual reduce el riesgo de erosión, en consecuencia el escurrimiento superficial en suelos forestales suele ser mucho menor que en ambientes agrícolas o urbanizados. Los ambientes boscosos desfasan temporalmente el flujo de tormenta en los ríos y arroyos, controlan así las crecidas y administran el agua en temporada de estiaje, Geissert *et al* (2012). Los mismos factores que promueven la infiltración, el flujo superficial, la retención y el almacenamiento del agua en las capas del suelo también regulan los flujos de sedimentos y nutrimentos al aminorar la erosión de la superficie.

En cuanto al coeficiente número 3 la relación que existe entre el pH potencial y la conductividad eléctrica es directa, el pH potencial es determinante para la entrada de sales al sistema como se observó anteriormente. Cuando el pH es ácido, la conductividad eléctrica es menor en el caudal. Los valores de pH ácidos, indica que el suelo tiene condiciones apropiadas para la retención de iones, ya que presenta mayor cantidad de materia orgánica y gran capacidad de almacenar sales.

Feijoó (2009), en diversos estudios ha mostrado la relación que existe entre el porcentaje de uso de suelo agrícola y las concentraciones de nitratos en aguas de los arroyos, al analizar esta relación en distintas escalas se encuentra que el uso de suelo en la zona ribereña presenta relaciones más fuertes con los niveles de nitratos, el estudio realizado en 23 arroyos en Buenos Aires sugiere que la concentración de nitratos está relacionada con el uso de suelo agrícola y que la estructura del suelo, como textura, contenido de materia orgánica, espacio poroso y el pH juegan un rol muy importante en la reducción o el transporte de los niveles de nitrato que llegan a los ríos. En la figura 42 se muestra la correlación que existe entre las variables las cuales tienden hacia la linealidad

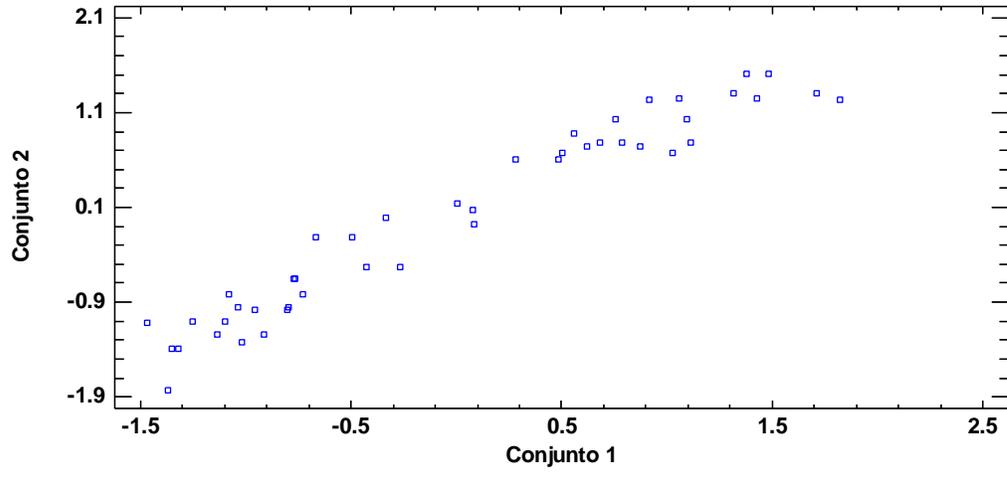


Figura 42. Gráfica de variables canónicas.

CONCLUSIONES

La deforestación, el uso de fertilizantes y la agricultura generan un aumento en la concentración de nutrimentos en el caudal.

Se registró una pérdida de materia orgánica y nitrógeno total en el suelo en las localidades de menor altitud y con asentamientos humanos.

La mayor solubilidad de oxígeno y buena calidad del agua se encuentra en localidades forestales que presentan menor grado de alteración.

El incremento en la DQO refleja la entrada de materia orgánica proveniente de desechos domésticos generando la contaminación del agua en localidades urbanas.

El nitrógeno total en suelo presentó una estrecha relación con el contenido de materia orgánica a través del gradiente altitudinal.

Las altas concentraciones de nitrato y amonio están relacionadas con sitios urbanos principalmente por el aporte directo de desechos domésticos que son vertidos directamente al cauce.

El proceso de lixiviación juega un papel importante en el transporte de iones hacia las corrientes superficiales. En las localidades que presentaron mayor porcentaje de espacio poroso la concentración de nitratos y amonio aumentó.

La pérdida de vegetación y suelo en zona ribereña provoca el incremento en algunas variables físicas y químicas del agua como las concentraciones de nitratos, amonio, durezas y los valores de conductividad eléctrica y pH.

El aumento en la concentración de nitratos, amonio, conductividad eléctrica, fósforo total, ortofosfatos y pH indica que el sistema se dirige hacia un proceso de eutrofización en las localidades dedicadas a la agricultura y urbanas.

El porcentaje de nitrógeno total en suelo se comporta de manera inversa con la concentración de nitratos y amonio del agua a lo largo del gradiente altitudinal.

De acuerdo al análisis de componentes principales se estableció que los nitratos, amonio, ortofosfatos, conductividad eléctrica, fósforo total, dureza de calcio, pH real y potencial están ligados a la erosión del suelo y al deterioro en la calidad del agua en las localidades de menor altitud.

El porcentaje de arcilla está ligado a la presencia de amonio y fósforo total, mostrando una correlación inversa a lo largo del gradiente altitudinal.

Se comprobó con el análisis de correlaciones canónicas que la densidad aparente, el porcentaje de humedad, el porcentaje de arcilla y el espacio poroso influyen en la concentración de nitratos, amonio, ortofosfatos y fósforo total en el agua.

RECOMENDACIONES

Establecer un plan de restauración de la zona ribereña sobre todo en las zonas agrícolas y urbanas que proporcione un filtro natural para el transporte de compuestos derivados del nitrógeno como nitratos y amonio así como fósforo total y fosfatos, para que se frene el proceso de erosión del suelo y favorezca el equilibrio entre los procesos hidrológicos y edáficos.

Conservar franjas de vegetación a cada lado del cauce de por lo menos 16 m de ancho con la finalidad de preservar el equilibrio del suelo y el agua en sitios alterados antropológicamente.

Las propuestas anteriores son encaminadas a lograr un proceso que facilite la depuración y la conservación del agua y el suelo en las localidades de menor altitud con el propósito de mantener estas áreas de importancia ecológica y económica para las comunidades aledañas a estos sistemas así como la preservación de los recursos hídricos y edáficos en el parque nacional y sus áreas de influencia.

Literatura citada

Álvarez N. A., Oria de Rueda S. J. A. 1999. Las riberas: Síntesis de la ecología de un ecosistema singular, Universidad de Valladolid, España.

Aparicio M. F. J., 1997. Fundamentos de hidrología de superficie, Editorial Limusa, México, Pág. 39.

APHA, AWWA WPCF, 1992. Métodos normalizados para el análisis de agua potable y residuales, Edición Díaz de Santos, España.

Arauzo S. M., Valladolid M., Martínez B. J. J., Gutiérrez C. 2006. Dinámica Espacio temporal del contenido de nitrato de las aguas superficiales y subterráneas del río Oja (La Rioja, España): Vulnerabilidad del acuífero aluvial, Departamento de Contaminación Ambiental Madrid, España.

Arredondo F. J. L., Ponce P. J. T. 1998. Calidad del Agua en Acuicultura, Editorial, AGT, México, Pág. 30-31.

Astudillo B. Y. 2006. Fosfatasa ácida y alcalinidad del suelo y su efecto en la disponibilidad del P en suelos de bosques templados de México, Facultad de Estudios Superiores, Tesis, México, Pág. 21, 22.

Avalos G. C., Palerm V. J. 2001. Organización Social y la Problemática del agua en la cuenca del río Cuautla, Mor. Consejo Nacional de Irrigación, México.

Ayala C. M. Y. 2011. Interacción ecológica del sistema agua-suelo en ambientes ribereños del parque nacional Izta-Popo y zonas de influencia, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Tesis, México. Pág. 73.

Cabrera L. M. 2007. Mineralización y nitrificación: procesos claves en el ciclo del nitrógeno, Departamento de ciencias de los suelos y cultivos, Instituto de Ecología, Universidad de Georgia, EE. UU. Pág. 6.

Carder I., Hofer T., Vermont S., Warren P. 2007. Hacia una nueva comprensión de los bosques y el agua. *Revista Internacional de silvicultura e industrias forestales*. 54(229):4.

Camacho R. F., Trejo I., Bonfil C. 2006. Estructura y composición de la vegetación ribereña de la barranca del río Tembembe, *Sociedad Botánica de México*, Boletín de la Sociedad de botánica de México número 078, Pág. 18.

Castillo G. M 2007. Manual de prácticas LIB IV, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Carrera de biología, Módulo de edafología.

Ceccon E. 2003. Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas, *Ciencias* (72):48,49 México.

Contreras S. S. , 2005. Ordenamiento Ecológico Regional en la zona de influencia de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, Centro Universitario para la Prevención de Desastres regionales de la Universidad Nacional Autónoma de Puebla, México.

Chara J., Pedraza G., Giraldo L., Hincapié D. 2007. Efecto de los corredores ribereños sobre el estado de quebradas en la zona ganadera del río La Vieja, *Agroforestería en las Américas*, Número 45.

Cruz F. G., Guerra H. E. A., Ángeles C. E. R. 2009. Descripción de propiedades físicas y químicas de agua y suelo en ambientes riparios en la exposición occidental del PN Izta-Popo. FES Zaragoza UMIEZ L-8.

Domínguez B. B. 2011. Levantamiento nutricional en *Abies religiosa* a lo largo de ciclo anual en el Parque Nacional Izta-Popo, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza Tesis, Pág. 66,67.

Donato R. J. C. 2008. Ecología de un río de montaña de los Andes Colombianos (Río Tota) Editorial Colciencias, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Pág. 32.

Donahue L. Roy, Miller W. Raymond, 1981. Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas, Editorial Prentice Hall, España, Pág. 128, 130.

Ezcurra E., Mazarí M., Pisanty I., Aguilar A. 2006. La cuenca de México aspectos ambientales, críticos y sustentabilidad, Editorial Fondo de cultura económica, México, Pág. 122, 123, 187, 188.

FEA "Fondo para la comunicación y la educación ambiental" 2006. El agua en México, lo que todas y todos debemos saber, 1 Edición, México, Pág. 23.

Feijoó C. 2009. La destrucción morfológica y biológica de los arroyos pampeanos, Programa de Investigación en Ecología Acuática, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján.

Fernández A., Calabug M. Luis. Análisis de correlaciones canónicas aplicadas al estudio de la relación entre la composición físico-química del agua y suelo aluvial en el río Bernesga (Leon), Departamento de ecología, Universidad de León.

Ferreras L. A., Costa J. L., García F. O. 1999. Temperatura y contenido hídrico del suelo en superficie durante el cultivo de trigo bajo dos sistemas de labranza. Facultad de Ciencias Agrarias, *Ciencias del suelo* 17(2):41.

Flores L. E. H., Carrillo G. R., Hidalgo M. C., Ruíz C. J. A., Castañeda V. A., Velazco N. R. 2009. Aportes de nitrógeno y fósforo de tres sistemas agrícolas de la cuenca hidrográfica El Jihuite en Jalisco México. *Agrociencias* v. 23(7):4.

Granados S. D., Hernández G. M.A., López R. G. F. 2006. Ecología de las zonas ribereñas, División de ciencias forestales, *Revista Chapingo*, 12(001):55-59.

Galván F. A., Márquez G. A. 2006. Descripción biofísica de la cuenca del río Coapa, Chiapas, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, *Hidrobiológica*, 16(002):108.

Guevara E. 2001. Modelación estocástica de DBO y OD. Caso Estudio río Cabriales, Ingeniería UC, año/vol. 8, número 2 Universidad de Carabobo, Venezuela.

Geissert K. Daniel., Gómez T. Alberto., Guevara S. Mario., 2012. Funciones ecohidrológicas del suelo, *BioDiversitas*, CONABIO 105(2012): 11

Hernández G., Rivera E. 1996. Evaluación de la calidad del agua del río La Compañía, en el transecto del municipio de Tlalmanalco a ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México, Marzo 1994- Febrero 1995, Tesis, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza , Universidad Nacional Autónoma de México, Pág. 109.

Hernández S. G. S. 2005. Ecología microbiana del suelo, compendio práctico, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Departamento de microbiología, Pág. 15-20.

Hidalgo M. V. 2003. Variabilidad de la relación DBO/DQO en ríos de Tucumán, Argentina, Dirección General de Saneamiento Ambiental, 13º Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente. Pág. 4.

Hudson N., 2006. Conservación del suelo, Editorial Reverté, España, Pág. 17-20

*(IPS, 1994) *Programa de intercalibración de análisis de suelos y plantas.*

Julca O. A., Meneses F. L., Blas S. R., Bello A. S., 2006. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura, Universidad Nacional Agraria La Molina, Depto. Fitotecnia, Lima, 24(1):10.

Kangarani H. M., Shalmelki T. 2007. Propuestas de política para la integración de los bosques, las aguas de la población en la cuenca del Tigris y el Éufrates, *Revista Internacional de silvicultura e industrias forestales* 2007(58):30.

Kutschker A., Brand C., Miserendino M.L. 2009. Evaluación de la calidad de los bosques de

ribera en ríos del NO del Chubut sometidos a distintos usos de la tierra. *Ecología Austral* Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Argentina, 19(01):2.

Leal A. Ma. T. 2005. Calidad del agua en los sistemas lagunares Chantuto-Panzacola y humedal Salto de Agua en La Encricijada, Chiapas, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, Pág. 2, 3.

Leal A. Ma. T. 2008. Evaluación de la afectación de la calidad del agua en cuerpos de agua superficiales y subterráneos por efecto de la variabilidad y el cambio climático y su impacto en la biodiversidad, agricultura, salud, turismo e industria, Instituto Mexicano de tecnología del agua.

Marmolejo S. Y., Prieto G. F., Pérez M. F., Beltrán H. R., Acevedo S. O., Maycotte M. C. 2006. Aplicación de estiércol bovino y su efecto sobre la calidad del agua subterránea de la cuenca lechera de Tizayuca Hidalgo, México, Ingeniería sanitaria Ambiental N°98 Pág. 51.

Manson H. R. 2004. Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques en México, Instituto de ecología, Madera y Bosques número 10, Pág. 4.

MATRIA La jornada 2007. Nuestro territorio, El parque izta-popo, Marzo 2007.

Miracle S. Ma. R. 2006. Consideraciones y casos en torno al ciclo del agua. Revista de la Universidad Bolivariana, Santiago Chile, 5(014):2.

Miranda H. G. P. 2004. Contribución al conocimiento de la calidad del agua en diferentes corrientes superficiales del parque nacional Izta-popo, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Tesis, México.

Morales B., Chávez G. 2010, Estimación de la carga de nutrientes procedentes de la carga de drenaje superficial del río Tepenaguasapa, Ministerio del Ambiente y los recursos naturales, Nicaragua. 23(01):19.

Morán M. Miroslava, Campos A. José, Louman B., 2006. Uso de principios, criterios e indicadores para monitorear y evaluar las acciones y efectos de políticas en el manejo de los recursos naturales, Colección manejo diversificado de bosques naturales, Pág 50.

Moosegar A., Warrick A. W. 1986. Hydraulic conductivity of saturated soil: field method. En: Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical methods, Agronomy monograph, No 9, American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, 667

Montalvo F. Jose.,Garcia Ll., Loza S., Esponda C. Santa., César E. María., González R. 2008. Oxígeno disuelto y materia orgánica en cuerpos de aguas interiores del Archipiélago Sabana-Camaguey, Cuba, Serie Oceanológica, Pág. 72, 73.

Mynor Romero 2010. Proceso de eutrofización de afluentes y su prevención por medio de tratamiento de afluentes, Facultad de Ingeniería, Revista Ingeniería Primero, No. 17, Guatemala, Pág. 64,65.

NMX-AA-008-SCFI-2000. Análisis de agua-Determinación dl pH (cancela a la NMX-AA-008-1980).

NOM-021-SEMARNAT-2000. Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad, y clasificación de los suelos, estudio, muestreo y análisis, para la clasificación del suelo.

NOM-001-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental "agua para uso y consumo humano.

Ortiz A. C. I., Gerritsen P. R. W., Martínez R. L.M, Allen A., Snoep M. 2005. Restauración de bosques ribereños en paisajes antropogénicos en el occidente de México, Cuba, pág . 2,4.

Oyarzun E. C., Campos H. 1997. Exportación de Nutrientes en Microcuencas con distinto uso de suelo en el sur de Chile, Instituto de Geociencias, Universidad Austral de Chile.

Pedraza X. G., Giraldo P. L., Chara D. J. 2008. Efecto de la restauración de corredores ribereños sobre características bióticas y abióticas de quebradas en zonas ganaderas de la cuenca del río la Vieja Colombia. Zootecnia Trop. 26(3):

Pérez N., Marañón A., López C., Pérez Y., Gonzáles A., Cascaret D., Guerra I., 2004. Contaminación de las aguas del río Cobre en la zona de la mina grande del Cobre, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de oriente, Pág. 33

Pritchett L. W. 1991. Suelos forestales: Propiedades, Conservación y mejoramiento, Editorial Limusa, México D.F.

Programa de intercalibración de análisis de suelo y plantas 1994. Manual de procedimientos analíticos de suelos y plantas del laboratorio de fertilidad de suelos. Colegio de postgraduados, Sociedad Mexicana de Ciencias del Suelo.

Rivas Z., Sánchez J., Troncone F., Márquez R., Ledo de Medina I., Colina M., Gutiérrez E. 2009. Nitrógeno y Fósforo totales de los ríos tributarios al sistema lago de Maracaibo, Interciencia, Venezuela, 34(05):308, 309.

Rodríguez R. Ernesto 1994. Procesos de eutrofización en siete lagunas urbanas de Villahermosa Tabasco, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México, Pág. 3.

Rodríguez H. F. 2004. Criterios e indicadores para evaluar la sustentabilidad del manejo forestal en Puebla, División de ciencias forestales, Chapingo Texcoco, México, Pág. 28.

Roldán P. Gabriel, Ramírez R. John, 2008. Fundamentos de limnología neotropical, Editorial Universidad de Antioquia, 2 edición, Colombia, Pág. 240.

Russell E. J., Russell E. W. 1968. Condiciones del suelo y el crecimiento de las plantas, Editorial Aguilar, España, Pág. 35, 43, 44, 341.

Salcedo P. E., Galvis E. A., Hernández M. T., Rodríguez M. R., Zamora N. F., Bugarin M. R., Carrillo G. R, 2007. La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo, *Terra Latinoamérica* 25(4): 6-7, Sociedad Mexicana del Ciencias del Suelo, Chapingo México.

Serrano L., Bravo M. A., Jiménez A., Prenda J., Martín I., Pidre J. R., Salas J. J. 2006. La contaminación por eutrofización en arroyos que vierten a la Marisma de Doñana, Departamento de biología vegetal y ecología, Universidad de Sevilla, Pág. 3.

Starr C., Taggart R., Portales G., Contreras M. Nancy, 2008. Biología, la unidad y diversidad de la vida, Editorial Learning, México, Pág. 840.

Valbuena V. 2006. Efecto del peso corporal y temperatura del agua sobre el consumo de oxígeno de tilapia roja (*Oreochromis sp*), Universidad de los Llanos, Villavicencio Colombia, Año/vol. 10, Pág. 58.

Vidales P. R. 2010. Estudio limnológico y ficológico en los ríos Apatlaco, Puebla y Amatzinac, Morelos, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis, Pág. 78.

Vázquez P. Arturo 2009. Agricultura y deterioro ambiental, Ciencia y cultura, Vol. 16 núm. 73, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Vigiak O., Ribolzi O., Pierret A., Valentín C., Sengtaheuanghoung O., Nobble A. 2007. Filtrado de los agentes contaminantes del agua por la vegetación ribereña: comparación de bambú con las pasturas nativas y el arroz en una cuenca de la Republica Democrática Popular Lao, Revista Internacional de silvicultura e industrias forestales año/vol. 2007, 58 Pág. 12

Wetzel G. R. 1981. Limnología, Ediciones Omega, España Barcelona, Pág. 170, 179, 180, 187, 198, 199.

Wetzel R. G. 2001. Limnology. Lake and river ecosystems . Third edition. Academic Press. U.S.A., Pág. 1006.

Zamora P. O. 2002. Efecto de la aplicación de aguas residuales industriales en las propiedades físicas y químicas del suelo, Colegio de Postgraduados, *Agrociencias* 36(003):283, Texcoco México.

Zapata A. A., Donato R. J. C. 2005. Cambios diarios de las algas perifíticas y su relación con la velocidad de la corriente en un río tropical de montaña (río Total-Colombia), Departamento de biología , Universidad nacional de Colombia, Bogotá, 24(3-4): 327.

PÁGINAS ELECTRÓNICAS

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.PDF>

<http://www.cna.gob.mx>

<http://www.iztapopo.conanp.gob.mx/mamiferos.php>

http://www.who.int/water_sanitation_health/dwg/gdwq3_es_full_lowres.pdf