



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

Actividades Arilsulfatasa y Ureasa en la fertilidad de suelos  
ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia

# T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

## BIÓLOGA

P R E S E N T A:

COLLI CORTÉS PAOLA MAGDALENA

DIRECTOR DE TESIS: DR. GERARDO CRUZ FLORES

Financiamiento PAPIME-PE 206413



MÉXICO, D. F.

JUNIO 2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## ***Dedicatoria***

*A Dios por todas las bendiciones que he recibido*

*A mis padres Ignacio Colli Fernández y Magdalena Cortes Mercado por su incondicional amor y apoyo.*

*A mis hermanos Toño, Yabin, Mariana y Flor por ser parte fundamental en mi vida.*

*A Diana y Mayeli gracias por su apoyo.*

*A Regina, Emiliano y Ariadna.*

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

Al Dr. Gerardo Cruz Flores por todos sus conocimientos transmitidos y tiempo invertido para mi formación profesional, gracias por su amistad y confianza.

A la maestra Eloisa por todo el apoyo otorgado durante la realización de este trabajo.

A los sinodales Faustino López Barrera, Gerardo Cruz Flores, Eloisa Guerra Hernández, Elvia García Santos y Leticia López Vicente por enriquecer este trabajo con sus observaciones.

A Xo, Nalleli, Ricardo, Cristian, Cohetero, Alma y Laura por los buenos momentos en laboratorio y prácticas de campo.

A Abimael por todo el apoyo a lo largo de este tiempo.

A todas las personas que me brindaron su amistad y confianza en el transcurso de la carrera, Yode, Paola, Paty, Ilse, Yas y Maye

## Listado de abreviaturas

AAS	Actividad arilsulfatasa
AU	Actividad ureasa
MOS	Materia orgánica del suelo
MO-CF	Materia orgánica de capa de fermentación
Nt-S	Nitrógeno total del suelo
Nt-CF	Nitrógeno total de capa de fermentación
pH-S	pH del suelo
pH-CF	pH de capa de fermentación

## Índice

	Página
Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Marco teórico	4
Fertilidad del suelo	4
Mineralización de compuestos orgánicos nitrogenados y azufrados: Ciclos biogeoquímico	7
Azufre	7
Nitrógeno	9
Enzimas del suelo	11
Arilsulfatasa	13
Ureasa	14
Suelos Forestales	15
Bosques ribereños	17
Justificación	18
Hipótesis	19
Objetivos	19
Zona de estudio	20
Suelos	21
Clima	22
Hidrología	23
Vegetación	24
Métodos	26
Delimitación de zona de estudio y muestreo	26
Análisis de laboratorio	28
Análisis estadístico	30
Resultados y discusión	31
Caracterización ecológica	32
Propiedades Físicas y Químicas del suelo y capa de fermentación	39
Sulfatos del suelo, capa de fermentación y actividad enzimática arilsulfatasa (AAS)	46
Concentración de N y actividad enzimática Ureasa (AU)	57
Conclusiones	63

Bibliografía	64
Anexo A	71
Anexo B	76

### Índice de Figuras.

Figura 1. Ciclo del Azufre.	9
Figura 2. Ciclo de Nitrógeno.	11
Figura 3. Categorías de las enzimas del suelo.	12
Figura 4. Parque Nacional Izta-Popo.	20
Figura 5. Modelo de muestreo para cada uno de los sitios visitados	26
Figura 6. Caracterización ecológica de sistemas ribereños	27
Figura 7. Muestreo de mantillo, capa de fermentación y suelo	28
Figura 8. Secado del suelo y reserva de las muestras.	28
Figura 9. Análisis de laboratorio: Propiedades físicas, químicas y biológicas de suelo.	29
Figura 10. Ubicación de los sitios de muestreo, ríos y grupos de suelo.	31
Figura 11. San Felipe Teotlalcingo. Río naciente del manantial y parcelas adyacentes al manantial y río	37
Figura 12. Izoalco. Cause del río y vegetación predominante.	37
Figura 13. Cause del río de Ejido Río Frío.	38
Figura 14. Cause del río y vegetación ribereña de Apatlaco.	38
Figura 15. A) Profundidad del suelo en los diferentes usos de suelo del PNIP. B) Densidad aparente en los diferentes usos de suelo de sistemas ribereños del PNIP.	42
Figura 16. A) Porcentaje de humedad de suelo y mantillo en los diferentes usos de suelo del PNIP. B) Carbono en mantillo en los diferentes usos de suelo en ambientes ribereños del PNIP.	43
Figura 17. A) pH en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelo del PNIP. B) Conductividad eléctrica en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelo en sistemas ribereños del PNIP.	44
Figura 18. A) Contenidos de Materia orgánica en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelo de sistemas ribereños del PNIP. B) Contenidos de Carbono orgánico en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelo de sistemas ribereños del	45

PNIP.

Figura 19. Relación carbono nitrógeno en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelos de sistemas ribereños del PNIP.	46
Figura 20. Concentraciones de sulfatos en los diferentes usos de suelos de sistemas ribereños del PNIP.	48
Figura 21 Concentración de sulfatos y su relación con los contenidos de Materia orgánica en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelo en sistemas ribereños del PNIP.	49
Figura 22. Emisiones de Bioxido de azufre del volcán Popocatepetl.	50
Figura 23. Peligros por caída de materiales volcánicos. CENAPRED 2014.	50
Figura 24. Concentración de sulfatos y su relación con el pH de suelo y capa de fermentación en los diferentes usos en suelo de sistemas ribereños del PNIP.	51
Figura 25. Valores de AAS y concentración de $SO_4^{-2}$ -S y $SO_4^{-2}$ -CF en los sitios ribereños de montaña del PNIP.	53
Figura 26. Valores de AAS y porcentaje de humedad de mantillo en sistemas ribereños del PNIP.	54
Figura 27. Valores de ASS y porcentaje de MOS y MO-CF en los diferentes usos del suelo en sistemas ribereños del PNIP	55
Figura 28. Valores de AAS y pH en suelo y capa de fermentación en diferentes usos de suelo en sistemas ribereños del PNIP.	55
Figura 29. Valores de AAS y densidad aparente en los diferentes usos de suelo en sistemas ribereños del PNIP	56
Figura 30. Porcentaje de Nitrógeno total en suelo y capa de fermentación y la actividad ureasa en los diferentes usos de suelo en sistemas ribereños del PNIP.	58
Figura 31. Actividad Ureasa y el porcentaje de Nitrógeno total en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelo en sistemas ribereños del PNIP.	59
Figura 32. Actividad ureasa y el % de materia orgánica en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelo en sistemas ribereños del PNIP	60
Figura 33. Valores de amonio soluble y AU en los diferentes usos de suelo en sistemas ribereños del PNIP.	60

## Índice de Cuadros

Cuadro 1. Elementos esenciales para el desarrollo de las plantas y sus formas asimilables.	5
Cuadro 2. Ejemplos de enzimas de los grupos principales (Paz, 2006).	13
Cuadro 3. Sistema de clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García. Programa de Manejo Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl, 2013.	22
Cuadro 4 Comunidades vegetales y especies dominantes correspondientes con gradiente altitudinal del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl (Programa de Manejo Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl 2013).	25
Cuadro 5. Uso de suelo dominante por intervalo de altitud.	32
Cuadro 6. Caracterización ecológica de los sitios de estudio del Parque Nacional Izta-Popo.	33
Cuadro 7a y 7b. Propiedades físicas y químicas del suelo y capa de fermentación para cada uso de suelo	39 y 40
Cuadro 8. Cuadro de Coeficientes de correlaciones de Pearson de las propiedades físicas y químicas de suelo y capa de fermentación.	41
Cuadro 9. Concentración de $\text{SO}_4^{-2}$ en suelo y capa de fermentación, concentración de AAS en los diferentes usos de suelo.	47
Cuadro 10. Análisis de varianza para sulfatos del suelo y capa de fermentación.	47
Cuadro 11. Coeficientes de correlaciones de Pearson para DA, % de humedad del mantillo, pH del suelo y capa de fermentación, MO del suelo y capa de fermentación, $\text{SO}_4^{-2}$ de suelo y capa de fermentación y arilsulfatasa.	52
Cuadro 12. Promedios de Nitrógeno total en suelo y capa de fermentación, amonio soluble y valores de AU en los cuatro diferentes usos de suelo..	57
Cuadro 13. Análisis de varianza para para nitrógeno del suelo y capa de fermentación.	61
Cuadro 14. Cuadro de Coeficientes de correlaciones de Pearson para densidad aparente, pH del suelo y capa de fermentación, materia orgánica del suelo y capa de fermentación, amonio, nitrógeno total de suelo y capa de fermentación y ureasa.	62

**RESUMEN**

El objetivo de este trabajo fue evaluar la actividad enzimática Arilsulfatasa (AAS) y Ureasa (AU) para relacionarlas con la fertilidad del suelo y utilizarlas como indicador de su calidad en un gradiente altitudinal con 21 sitios ribereños con afluentes de régimen permanente adyacentes a terrenos de usos de suelo urbano, agrícola, pecuario y forestal sobre las Cuencas del Alto Balsas y la de México en el Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia. En cada sitio ribereño se consideraron cuadrantes de 30 m × 7 m a ambos lados del río donde se realizó la descripción del material geológico, relieve, temperatura y humedad ambiental, características edáficas y el tipo de vegetación predominante. Aunque las variaciones ecológicas se presentan en cambios graduales y los factores ambientales no tienen límites fijos, los sitios se agruparon en intervalos altitudinales correspondientes a cuatro intervalos altitudinales definidos en general por semejanzas en el uso de suelo y porque sus condiciones ecológicas mostraron características particulares de cada intervalo altitudinal. Se tomaron muestras compuestas de 0-20 cm de profundidad para los análisis físicos y químicos del suelo y otras de 0-10 cm para las actividades enzimáticas. La caracterización del suelo mostro, al comparar con los estándares de la NOM-021-SEMARNAT-2000, que las propiedades físicas y químicas del suelo fueron semejantes en ambas cuencas con porcentajes de materia orgánica en niveles medios principalmente, densidades aparentes menores a uno característicos de suelos volcánicos y pH(s) moderadamente ácidos los cuales son menos ácidos (pH=6) al disminuir la altitud. Con los resultados de los análisis de laboratorio, se realizaron pruebas estadísticas de correlaciones de Pearson, análisis de varianza y pruebas de Tukey con un modelo estadístico en el que los factores de variación fueron los usos de suelo y altitud. La actividad hidrolítica de la AAS, liberó entre 0.38 y 2.28 kg de  $\text{SO}_4^{-2}$   $\text{ha}^{-1}$   $\text{dia}^{-1}$  encontrándose la mayor liberación de sulfatos en la Cuenca del Alto Balsas en el intervalo de mayor altitud (3500-4000 m) y la menor en el intervalo más bajo (2000-2500 m) de esta cuenca, por lo que la AAS fue mayor conforme la altitud se incrementó y en general su actividad fue mayor en suelos donde hubo menor contenido de materia orgánica. Al igual que la AAS, correspondientemente el ion  $\text{SO}_4^{-2}$  aumentó sus concentraciones al incrementarse la altitud, aunque también deben considerarse las exhalaciones recientes del volcán Popocatepetl que se han registrado en los dos últimos años en los que se llevó a cabo el trabajo de campo. El análisis estadístico mostró que la concentración del  $\text{SO}_4^{-2}$  se relacionó significativamente con el pH de suelo ( $r=-0.333$ ,  $p\leq 0.05$ ) y con la MOS ( $r=0.579$ ,  $p\leq 0.05$ ). La AU libera entre 110 y 2892 kg  $\text{NH}_4^+$   $\text{ha}^{-1}$   $\text{dia}^{-1}$  siendo los sitios de la cuenca de México del tercer intervalo altitudinal (3000-3500 m) donde hubo la mayor actividad. El nitrógeno total de los suelos ribereños fue considerado bajo con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000 en los cuatro intervalos altitudinales y en general incrementa su concentración conforme aumenta la altitud. El  $\text{NH}_4^+$  tiene un comportamiento similar a la materia orgánica, el  $\text{NH}_4^+$  tiene una correlación significativa con la AU ( $r=-0.22$ ,  $p\leq 0.05$ ), comprobando que la AU está determinada por la cantidad de  $\text{NH}_4^+$  disponible y sustrato en el suelo. La participación de la AAS y AU en la dinámica de los ciclos biogeoquímicos de S y N en suelos de sistemas ribereños determina que se puedan utilizar como indicadores de su calidad porque en general su actividad depende de la concentración de iones disponibles en la solución del suelo y de los aportes externos e internos de MO de la biota hacia el suelo de los sistemas ribereños según el estado ecológico que prevalecen en los diferentes usos de suelo a través del gradiente altitudinal.

**Abstract**

The aim of this study was to evaluate Soil Arylsulfatase and soil urease activities and its relationships to soil fertility and this application them as indicators of soil quality at 21 sites bordering with streams and rivers adjacent to permanent regime to land uses urban, agricultural, livestock and forestry land in an altitudinal gradient on the Alto Balsas Basin of Mexico in the Iztaccihuatl-Popocatepetl National Park and its influence zone. They were defined quadrants of 30 m × 7 m on both sides of the river in each riparian soil, and performing description of geological material, landform, temperature and humidity, soil characteristics and the predominant type of vegetation. Although the ecological variations occur gradually and environmental factors have no fixed boundaries, the sites are grouped into four altitudinal intervals, for similarity in land use and ecological conditions showed specific characteristics of each altitudinal interval. Composite soil samples from 0-20 cm depth for physical and chemical analysis and other 0-10 cm for determination of soil enzyme activities were taken. The results of physical and chemical soil properties were compared with the standards NOM-021-SEMARNAT-2000, obtaining percentages of organic matter mainly in middle levels, bulk densities less than 1 characteristic of volcanic soils and pH (s) moderately acids and these are less acidic (pH = 6) with decreasing altitude. A data of the results of laboratory analysis were performed statistical tests of Pearson correlation, analysis of variance and Tukey test with a statistical model in which variation factors were the land use and altitude. The hydrolytic activity of ASS released between 0.38 and 2.28 kg of  $\text{SO}_4^{-2}$  ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>. In the interval of higher altitude (3500-4000 m) increased release of sulfates in the Alto Balsas and lower release of these ions in the lowest range (2000-2500 m) of the basin, so that the AAS was higher as altitude increase, in general the activity was higher in soils where there was less content organic material. Like the AAS, the  $\text{SO}_4^{-2}$  ion concentrations increased with increasing altitude, but also must consider the recent exhalations of Popocatepetl volcano have been recorded in the last two years that was conducted fieldwork. Statistical analysis showed that the concentration of  $\text{SO}_4^{-2}$  were significantly correlated to the soil pH ( $r = -0.333$ ,  $p < 0.05$ ) and the MOS ( $r = 0.579$ ,  $p < 0.05$ ). The AU released between 110 and 2892 kg  $\text{NH}_4^+$  ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup> being the sites located on the basin of Mexico between 3000 and 3500 m where there was increased activity. The total nitrogen of riparian soils was considered low based on NOM-021-SEMARNAT-2000 in the four different land uses, and increases general the concentration with increasing altitude. The  $\text{NH}_4^+$  has a similar behavior to organic matter. The  $\text{NH}_4^+$  has a correlation significant with the AU ( $r = -0.22$ ,  $p \leq 0.05$ ), ensuring that the AU are determined by the amount available of  $\text{NH}_4^+$  and the soil substrate. The participation of the AAS and AU in the dynamics of the biogeochemical cycles of S and N in soils of riparian systems determines its use as indicators of quality because in general their activity depends on the concentration of available ions in the soil solution and external and internal contributions of MO and biota to the ground, according to the ecological status prevailing in the different land uses across the altitudinal gradient.

## INTRODUCCIÓN

La actividad enzimática del suelo ha sido un tema muy estudiado en los últimos años, debido a su gran importancia como indicador de la calidad del suelo. Doran y Parkin en 1994 definen la calidad del suelo como *“la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites ecológicos, para sostener la productividad biológica, manteniendo la calidad ambiental, y promoviendo la salud de la flora y fauna”*. La fertilidad del suelo se entiende como su capacidad para suministrar los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas en proporción y cantidad adecuada (Cruz, 2006), por lo tanto la fertilidad del suelo es un indicador de su calidad. La disponibilidad de los nutrientes para el crecimiento de la planta se encuentra limitada por diferentes factores entre los que se encuentran las propiedades físicas y químicas del suelo, y el clima, etc. Las enzimas del suelo, son proteínas que pueden suministrar a la solución del suelo los nutrimentos que en ciertas condiciones de estrés nutrimental no se encuentran disponibles. Tal es el caso de la Arilsulfatasa y Ureasa que actúan sobre compuestos orgánicos, y liberan radicales sulfato y amonio que son de fácil asimilación para las plantas. Estos grupos químicos tienen un papel fundamental en el desarrollo vegetal, formando parte de algunas proteínas principalmente.

En los ecosistemas la dinámica de los ciclos biogeoquímicos es la encargada de la regulación de los elementos C, H, O, N, P y S, en una cuenca hidrográfica los sistemas ribereños son esenciales para su reciclamiento y captación, pues los procesos físicos y químicos en suelo y agua repercuten sobre la vegetación y se encuentran directamente relacionados entre sí.

El Parque Nacional Izta-Popo es un remanente de bosques de coníferas y es el parteaguas de las cuencas más importantes del centro del país: la Cuenca de México (occidente) y la Cuenca del Alto Balsas (oriente) (CONANP, 2014). Estas cuencas son proveedoras de agua al valle de México y al valle de Puebla respectivamente y han sufrido cambios de uso de suelo de ecosistemas forestales hacia agricultura o ganadería, aunado a la contaminación en ciertas zonas, y al desarrollo de actividades turísticas que han impactado negativamente a sus ecosistemas. El presente estudio tiene la finalidad de comparar la fertilidad de los suelos ribereños en bosques templados con diferentes usos de suelo y en el gradiente altitudinal a través de evaluar los contenidos de N y S asimilables que derivan de la hidrólisis de materia orgánica por las actividades arilsulfatasa y ureasa, dentro de las Cuencas del Valle de México y del Alto Balsas.

## MARCO TEÓRICO

El suelo es definido según la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SEMARNAT, 2013) como la “capa superficial del material mineral y orgánico no consolidado que sirve de medio natural para el crecimiento de las plantas, y que ha sido sujeto y presenta los efectos de los factores que le dieron origen (clima, topografía, biota, material parental y tiempo) y debido a la interacción de estos, difiere en sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas del sustrato rocoso del que se originó”. Todas las interacciones de los factores formadores de suelo han originado según la WRB (2007) más de 30 grupos de suelos distintos tanto en morfología como en su fertilidad.

### Fertilidad del suelo

La fertilidad del suelo se relaciona directamente con la salud vegetal. Como se sabe las plantas necesitan de luz, agua y oxígeno para realizar procesos fundamentales como la fotosíntesis, sin embargo, el suelo juega un papel primordial, pues en él se encuentran los elementos minerales que necesita para su desarrollo y crecimiento.

Las características y propiedades del suelo están fuertemente vinculadas con su proceso pedogenético y sus factores de formación (WRB, 2007). El clima es uno de los factores principales que interviene en la formación del suelo por ello ante la gran diversidad de climas, se tiene en el mundo una gran variedad de tipos de suelos, los cuales se desarrollan también de acuerdo a su posición en el relieve, topografía y tiempo. La vegetación ha desarrollado mecanismos de adaptación morfológicos o fisiológicos que le permite crecer en distintos climas y tipos de suelo, aun en condiciones de estrés hídrico o nutricional.

Las plantas pueden absorber elementos de la solución del suelo en forma abundante, encontrándose más de 90 de ellos en su biomasa, lo cual no significa que todos sean indispensables para su crecimiento, pues tan solo se conocen 16 elementos esenciales para su desarrollo (Tisdale, 1991). El carbono, hidrógeno y oxígeno se obtienen a partir del dióxido de carbono y del agua, los demás elementos se toman del suelo, son absorbidos en forma iónica a través de las raíces de las plantas, los cuales están clasificados en macronutrientes (Nitrógeno, Fosforo, Potasio, Calcio, Magnesio y Azufre, se requieren en mayor cantidad) y micronutrientes, elementos traza u oligoelementos (Hierro, Cloro, Boro, Manganeso, Cobre, Molibdeno y Zinc, se requieren en muy bajas cantidades), sus formas asimilables se presentan en el Cuadro 1. Los iones presentes en la solución del suelo acceden al entorno de la raíz mediante difusión, o junto con el agua que entra en las raíces por desplazamiento en masa o por crecimiento de las raíces que llegan a los compartimentos del suelo donde pueden encontrarse dichos nutrientes.

Un elemento se considera esencial al cumplir tres criterios: a) al carecer de este elemento la planta no puede completar su ciclo de vida; b) forma parte de cualquier molécula o constituyente de la planta; c) debe actuar directamente en el interior de la planta, sin que influya en algún otro elemento haciéndolo fácilmente disponible, ni antagonizar el efecto de algún otro elemento (Salisbury, 2000).

Para que las plantas puedan obtener estos nutrientes es necesario tomar en cuenta la fertilidad del suelo, la cual está condicionada por los factores físicos, químicos y biológicos, como el material de origen, el clima presente, la topografía de la región y procesos de degradación y mineralización en los que intervienen diversos organismos. El desarrollo de las raíces, lugar donde se lleva a cabo la absorción de los elementos en forma de iones, está determinado por la impedancia mecánica, la temperatura, la aireación, de la disponibilidad de agua y de sales minerales.

Cuadro 1. Elementos esenciales para el desarrollo de las plantas y sus formas asimilables.

Macroelemento	Forma asimilable	Microelemento	Forma asimilable
Carbono	CO <sub>2</sub>	Hierro	Fe <sup>2+</sup>
Hidrógeno	H <sub>2</sub> O	Cloro	Cl <sup>-</sup>
Oxígeno	O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	Manganeso	Mn <sup>2+</sup>
Nitrógeno	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Zinc	Zn <sup>2+</sup>
Potasio	K <sup>+</sup>	Boro	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>
Fósforo	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cobre	Cu <sup>+</sup> , Cu <sup>2+</sup>
Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	Molibdeno	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Azufre	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		
Calcio	Ca <sup>2+</sup>		

(Modificado de Cruz, 2006).

Los factores que afectan la fertilidad del suelo son las siguientes.

La textura se refiere al porcentaje en peso de cada una de las tres fracciones minerales, arena, limo y arcilla. Las arcillas junto con la materia orgánica son importantes por su capacidad de almacenar agua y nutrientes, ya que su superficie es grande y está cargada eléctricamente, los nutrientes son retenidos y pueden ser utilizados por las plantas, aunque suelos con alto contenido de arcillas tienen poca aireación. Las partículas grandes constituyen el esqueleto del suelo a ellas se deben la mayor parte de su peso y

ayudan a conseguir una buena aireación y permeabilidad. La textura afecta directamente a la estructura del suelo, porosidad y densidad (Thompson y Troeh, 1982; Jaramillo 2002, Cruz 2006).

La temperatura influye sobre el crecimiento y metabolismo de las plantas, además de su determinación por el clima y las condiciones meteorológicas se ve afectado por factores como la cobertura del suelo, el color, contenido de agua, profundidad, época de medición y al ángulo de incidencia de los rayos solares, éste último no solo se halla relacionado con la latitud y el clima de la zona sino también con la exposición de la vertiente. Cuando más perpendiculares incidan los rayos solares sobre la superficie del suelo mayor será la temperatura alcanzada (op cit).

La actividad microbiana es esencial para la liberación de los nutrientes contenidos en los materiales vegetales a través de la mineralización de la materia orgánica del suelo (Alexander, 1980).

Los microorganismos forman una parte importante en los ciclos biogeoquímicos, de manera que los nutrientes absorbidos por las plantas pueden volver al suelo. Así los mismos iones pueden ser utilizados una y otra vez. La actividad microbiana suele ser un buen indicador de la fertilidad del suelo. Los factores que pueden interrumpir esta actividad son la aireación, el aporte de agua, la temperatura, el pH, y el suministro de nutrientes.

El pH del suelo influye en la tasa de liberación de nutrientes por intemperismo, en la solubilidad de todos los materiales del suelo y en la cantidad de iones nutritivos almacenados en los sitios de intercambio catiónico. El pH es un buen indicador para predecir cuales son los nutrientes que pueden encontrarse en estado deficitario, o indicar cuáles de estos elementos pueden producir toxicidad (Rengel, 2002).

Otro factor importante para la fertilidad del suelo es el contenido de materia orgánica (MOS), ésta contiene los elementos esenciales para las plantas. Los residuos vegetales y animales contienen cantidades variables de elementos minerales tales como nitrógeno, fósforo, magnesio, calcio, azufre y los micronutrientes. En zonas de clima templado frío y frío en donde la descomposición de la MOS se produce a menor velocidad, sus niveles pueden ser bastante altos.

La topografía es un factor geomorfológico muy importante ya que este modifica el microclima e influye en la vegetación provocando un efecto notable sobre la cantidad de materia orgánica en el suelo. Los suelos con pendientes fuertes sufren una mayor escorrentía y presentan menos agua disponible para las plantas. El contenido de materia orgánica es menor, no solo por el reducido crecimiento de la vegetación, sino también que la materia orgánica producida se pierde por la erosión en las fuertes

pendientes, sobre todo en su parte superior (Thompson y Troeh, 1982; Cruz-Flores y Guerra-Hernández, 2014)

Al estar condicionada la disponibilidad de los nutrientes por estos factores las características de cada ecosistema varían fuertemente en su fertilidad, al modificarlos se rompe un delicado equilibrio, esencial para un buen funcionamiento de los ciclos.

### **Mineralización de compuestos orgánicos nitrogenados y azufrados: ciclos biogeoquímicos**

Para la obtención de las formas inorgánicas de los elementos es necesario que se lleve a cabo el reciclaje de los nutrientes, en donde la mineralización es fundamental para este proceso. La mineralización se refiere a la formación de compuestos minerales por la acción de los microorganismos que transforman compuestos orgánicos, que son adicionados principalmente como, residuos de plantas, organismos vivientes o muertos. Este proceso mantiene la fertilidad del suelo pues forma parte de los ciclos biogeoquímicos de algunos nutrimentos como el nitrógeno, fósforo, azufre y carbono (*Duchaufour et al*, 1984; Montagnini, 2002). La mineralización está condicionada por el clima, la mineralogía de las arcillas, el estado de los nutrientes del suelo, la actividad de la biota edáfica y la calidad de los recursos en descomposición (Sundarapandian, 1999). El azufre y el nitrógeno son compuestos que las plantas obtienen del suelo por medio de la descomposición de la materia orgánica que se mineraliza.

#### **A) Azufre**

Este elemento es absorbido por las plantas y los microorganismos en forma de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), es reducido hasta sulfuro ( $\text{S}^{-2}$ ) y es incorporado a los aminoácidos: cistina, cisteína y metionina que aparecerán en forma libre, normalmente, en pequeñas cantidades pues se transforman rápidamente en proteínas, o pueden formar parte de hormonas, lípidos y vitaminas entre otros. La materia viva y muerta constituye un reservorio menor de azufre (S) pero es reciclado rápidamente. El azufre reducido se encuentra presente también en algunas coenzimas y vitaminas como biotina, tiamina y coenzima A, también se encuentran en ferredoxinas que intervienen en la fotosíntesis y en grupos de sulfuro de hierro, cofactores y sulfolípidos (Rüdiger y Cordula, 2007).

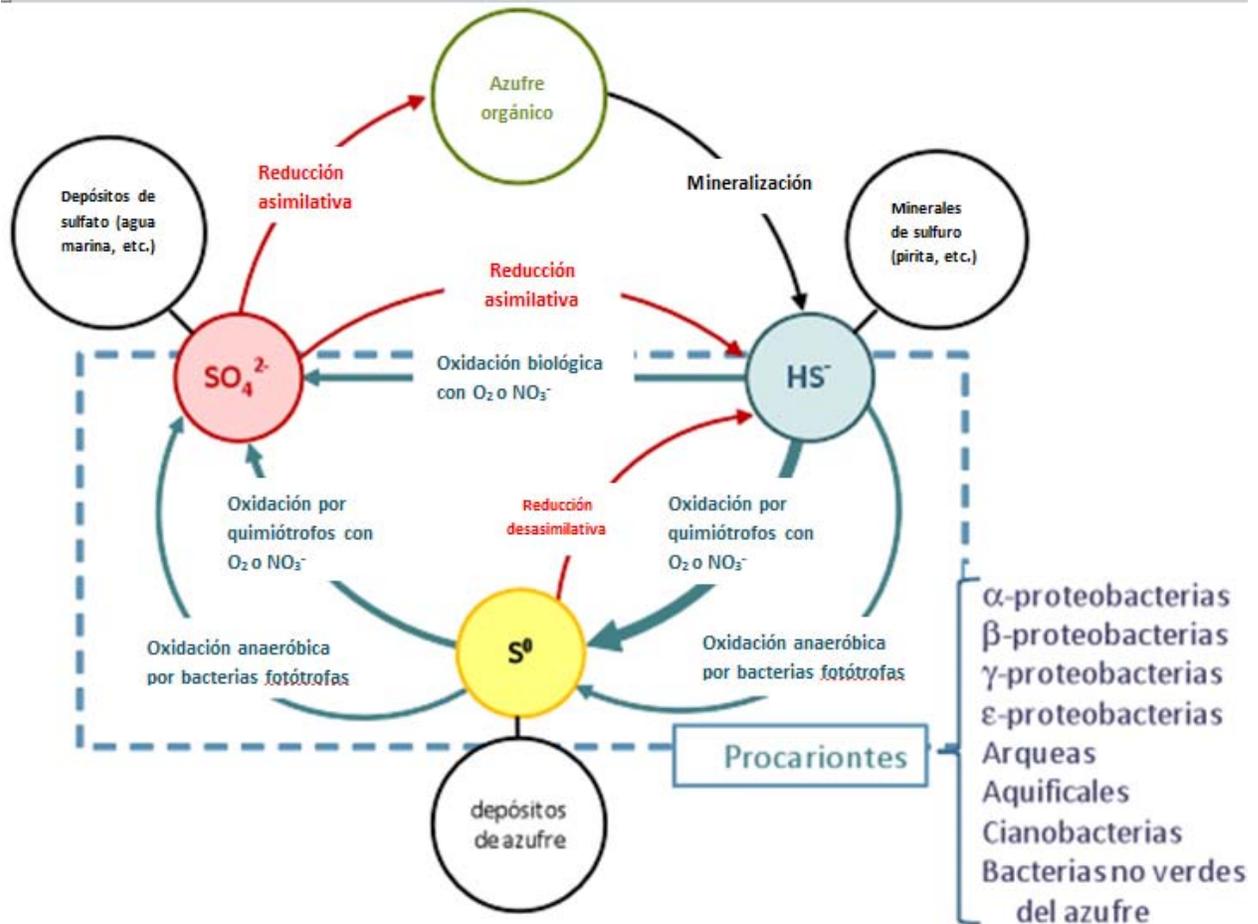
En la naturaleza el azufre está presente en compuestos como el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), la anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) y la epsomita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) y en minerales poco solubles como los sulfuros esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) y calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). De los componentes azufrados presentes en la atmósfera, el  $\text{SO}_2$  es de los más importantes, derivan de la combustión del carbón y de los productos petrolíferos con elevado contenido de azufre (Urbano, 1992; Likens *et al*, 2002).

La mayor parte del  $\text{SO}_4^{2-}$  que se encuentra en la solución del suelo proviene principalmente de la mineralización de los compuestos como la cisteína, cistina y metionina (Blasco, 1970). Según McGill y Cole (1981) existen dos tipos de procesos implicados en la mineralización de compuestos orgánicos de azufre en el suelo: la mineralización biológica y la mineralización bioquímica. La primera consta de las necesidades de carbono (C) orgánico que tienen los microorganismos para producir energía, en donde la oxidación de C a  $\text{CO}_2$  genera como subproductos la liberación de sulfatos. Ya se señaló que existen diferentes factores que afectan la actividad microbiana, como temperatura, humedad y pH, además la disponibilidad de sustrato influye en el proceso de mineralización, inmovilización, oxidación y reducción (Hancklaus *et al*, 2007) (Figura 2). Por ejemplo la oxigenación del suelo determina la dirección de las reacciones de oxidación para la formación de sulfatos por medio de microorganismos aerobios, tal es el caso del género *Thiobacillus* principalmente, estos microorganismos son quimioautótrofos estrictos, mientras que los microorganismos anaerobios que generan sulfuro y  $\text{H}_2\text{S}$  pertenecen al género *Desulfovibrio*, grupo más importante en la reducción de los compuestos azufrados.

Otros organismos que participan en la oxidación del azufre pertenecen a los siguientes géneros: *Beggiatoa*, *Thiothrix*, *Thioplaca*, *Leucothrix*, *Achromatium*, *Thiobacterium*, *Thiocystis* y las bacterias fotoautótrofas púrpuras (familia Thiorethraceae) y verde (familia Chlorobacteriaceae). Para la reducción del azufre se encuentran los siguientes géneros: *Desulfotomaculum*, *Bacillus megaterium*, *Pseudomonas zelinskii*, *Vibrio desulfuricans*, y *Vibrio aestuarii* (Blasco, 1970)

Mientras que la mineralización bioquímica se basa en la liberación de sulfato mediante la hidrólisis enzimática del éster sulfato de la materia orgánica (McGill y Cole, 1981).

Eriksen (1996) menciona que la contribución de S por mineralización de restos vegetales es pequeña, alrededor de 1.7 a 3.1 % por año, por lo que no es suficiente para satisfacer las necesidades de las plantas, esto se debe a que posiblemente tanto la mineralización, inmovilización y la lixiviación del S ocurren simultáneamente (Ghani *et al.*, 1993). Y en los casos de cultivos de alto rendimiento no pueden satisfacer su demanda por mineralización o depositación atmosférica de azufre (Schnug y Haneklaus, 1998).

Figura 1. Ciclo del Azufre (Espinoza *et al.*, 2010).

## B) Nitrógeno

Este elemento se encuentra principalmente en la atmósfera, es de lenta y difícil incorporación para las plantas. Existe una importante, pero insuficiente reserva de este elemento en rocas ígneas con un total de  $1.4 \times 10^6$  toneladas, y en rocas sedimentarias con  $4 \times 10^{15}$  toneladas, encontrándose en forma de amonio fijado, no intercambiable. Los iones de nitrógeno inorgánico son amonio, nitrito y nitrato y estos se encuentran como sales muy solubles en agua.

El nitrógeno juega un papel esencial como constituyente de proteínas, ácidos nucleicos, clorofila y hormonas del crecimiento. La mayor parte de las plantas dependen, absolutamente, para su crecimiento del nitrógeno inorgánico absorbido del suelo en forma de iones nitrato o amonio (Marchner, 1995). Este elemento retorna al suelo por la descomposición de compuestos orgánicos de la actividad microbiana, produciendo amonio mediante el rompimiento de las proteínas. Asimismo el N es transformado a

amonio por la fijación biológica del nitrógeno, los microorganismos capaces de realizar este proceso poseen la enzima nitrogenasa, principalmente se conoce a *Rhizobium* y *Azotobacter* de vida libre, actinomicetos del género *Frankia*, entre otros microorganismos (Figura 2).

La mineralización microbiana de la materia orgánica del suelo es la principal fuente de amonio para las plantas (Urbano, 1992), pero no existe un buen almacén para las formas obtenibles de nitrógeno, en donde los iones de amonio pueden retenerse de forma intercambiable en la superficie de los cristales de la arcilla y del humus dificultando su acceso, además la rápida transformación del amonio en nitratos por las bacterias, es fácilmente lixiviable. El nitrógeno en el suelo en un momento determinado, depende de muchos factores climáticos y edáficos así como las perturbaciones humanas que influyen en la relación entre adiciones vegetales y animales (entrada) y la tasa de descomposición (salida). El nitrógeno total en suelos forestales se encuentra sobre todo en las capas de humus de la cubierta forestal (materia orgánica como hojarasca y capas de materiales en descomposición que se encuentran sobre el suelo mineral) y en el horizonte A (Pritchett, 1991).

En muchos ecosistemas forestales las tasas de mineralización de este elemento (N) puede regular la productividad de muchos bosques (Miller *et al.*, 2003). Al encontrarnos en condiciones favorables el amonio es rápidamente oxidado por dos grupos altamente especializados de bacterias quimioautótrofas aerobias estrictas: Nitrosomonas y Nitrobacter. Donde el amonio oxidado es transformado a nitritos y posteriormente a nitratos, proceso llamado nitrificación. En condiciones anaerobias algunas bacterias pueden utilizar al nitrato en lugar de oxígeno como aceptor final de electrones. Siempre que la materia orgánica se descompone en el suelo o el agua y se agota el oxígeno como resultado de la respiración aeróbica microbiana, algunos de estos aerobios continuarán respirando la materia orgánica si hay nitrato presente, mediante respiración anaerobia. Como consecuencia el nitrato se reduce, algunas bacteria solo son capaces de reducir el nitrato hasta nitrito, pero una variedad de bacterias son capaces de realizar una cascada de dos respiraciones anaerobias subsecuentes por las que el ion nitrato se reduce a óxido nitroso gaseoso ( $N_2O$ ) y luego a nitrógeno ( $N_2$ ), este proceso es llamado desnitrificación, el nitrógeno combinado se elimina del suelo y del agua liberándose  $N_2$  gaseoso a la atmosfera (Stanier *et al.*, 1992).

## Ciclo del nitrógeno

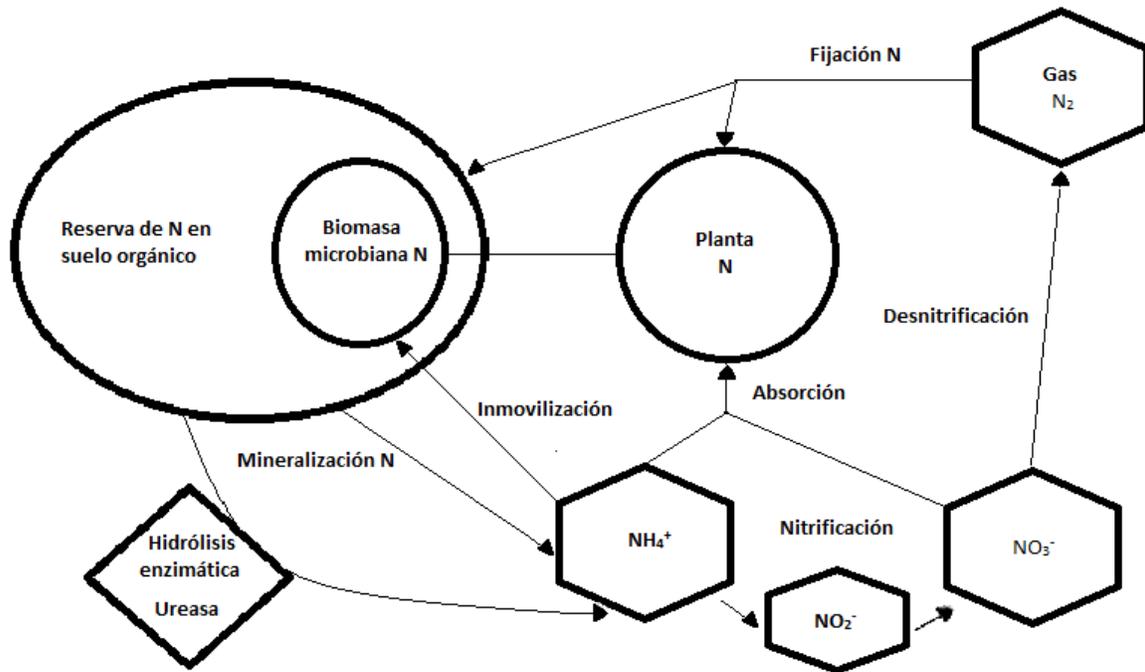


Figura 2. Ciclo del nitrógeno. Modificado de Muephy *et al.*, 2003, *Advances in Agronomy* 85-69-118. Tomado de Deenik, 2006.

Los microorganismos del suelo representan el componente esencial del sistema biótico en los bosques naturales, determinantes en los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes, donde las enzimas excretadas por raíces de las plantas y los microorganismos forman una parte esencial en estos procesos. La actividad enzimática es uno de los indicadores utilizados para conocer la fertilidad del suelo, participa en muchos procesos biológicos, es de fácil medición y tiene una respuesta rápida a las alteraciones producidas por el cambio de uso y manejo del suelo (Lillo *et al.*, 2011).

### Enzimas del suelo

Las enzimas del suelo son proteínas solubles, de naturaleza orgánica y estado coloidal, elaboradas por células vivas, que actúan independientemente de éstas (Acosta y Paolini, 2005).

La actividad enzimática juega un papel importante en la descomposición de la materia orgánica y la mineralización de algunos compuestos orgánicos que contienen C, N, P y S, y en el suelo son sensibles a los cambios para determinar su calidad (Bandick y Dick, 1999) teniendo una rápida respuesta a las

perturbaciones (Trasar-Cepeda *et al*, 1998), lo que las convierte en indicadores idóneos del impacto de un determinado manejo en los ecosistemas (Dick, 1992).

Las enzimas actúan sobre un sustrato específico y están relacionadas con reacciones específicas. La velocidad de la reacción catalizada por una enzima depende del pH, de la fuerza iónica, de la temperatura y de la presencia o ausencia de inhibidores (Burns 1982; Tabatabai, 1994).

La actividad enzimática particular para cada caso en suelo depende de su localización (Figura 3), pueden encontrarse intracelularmente, en restos de células muertas, desechos celulares, extracelulares libres en la solución del suelo, absorbidas en los coloides inorgánicos y asociadas en varias formas con moléculas húmicas (Nannipieri *et al.*, 2002), pueden clasificarse de diferentes formas.

Clasificación de las enzimas según su localización (Nannipieri *et al.*, 2002).

Endoenzimas, asociadas a células activas, localizadas intracelularmente, en el citoplasma celular, en el espacio periplásmico y en superficies exteriores de la célula.

Exoenzimas, son aquellas excretadas por células vivas, unidas a células muertas o presentes extracelularmente en el suelo en donde pueden existir como enzimas estabilizadas en dos lugares: absorbidas a la superficie interna o externa de las arcillas y en complejos organometálicos en los coloides húmicos a través de procesos de adsorción o por haber sido atrapadas o copolimerizadas durante la formación del humus.

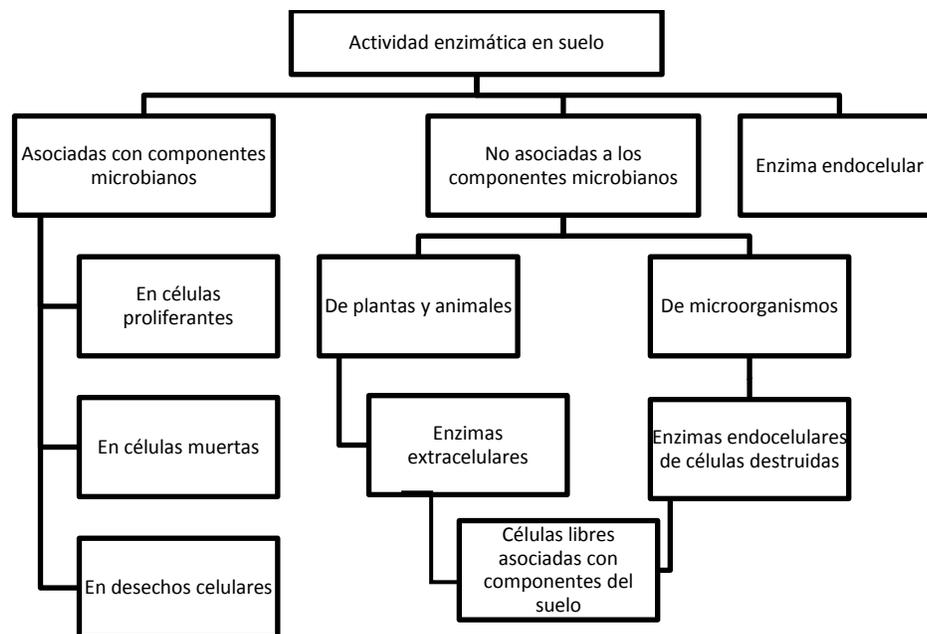


Figura 3. Categorías de las enzimas en el suelo. Tomado de Gianfreda y Rao, 2011.

De acuerdo con la reacción que catalizan, las enzimas se clasifican en seis grupos principales:

Oxidorreductasas, transferasas, hidrolasas, liasas, isomerasas y ligasas. Las principales enzimas estudiadas en el suelo pertenecen a los cuatro primeros grupos (Cuadro 2) (Paz, 2006).

Cuadro 2. Ejemplos de enzimas de los grupos principales (Paz, 2006).

Enzimas	Grupos
Deshidrogenasa, Catalasa, Peroxidasa	Oxidorreductasas
Fosfatasas, Sulfatasas, Amilasas, Celulasa, Invertasa $\beta$ - y $\alpha$ - glucosidasas, $\beta$ y $\alpha$ - galactosidasa, Asparginasa, Glutaminasa, Amidasa y Ureasa	Hidrolasas
Rhodanasa	Transferasas
Glutamato descarboxilasa	Liasas

Las enzimas hidrolíticas están relacionadas directamente con los macronutrientes del suelo, actúan directamente sobre la materia orgánica, proporcionando C, N, P y S en condiciones adversas, y están relacionadas con algún tipo de deficiencia que limita la productividad primaria en los ecosistemas.

Las sulfatasas son un grupo de enzimas que reaccionan con diferentes sustratos. Ayudan a la mineralización de los compuestos presentes en el suelo que contienen azufre: hidrolizan los sulfatos orgánicos, de manera que proporcionan a las plantas azufre disponible. Pueden ser de origen animal vegetal y microbiano principalmente. Se encuentran de forma extracelular y están relacionadas con el contenido de materia orgánica, su contenido de azufre total y su capacidad de intercambio catiónico (Paz, 2006).

### Arilsulfatasa

La arilsulfatasa es un conjunto enzimático de baja densidad que cataliza la hidrólisis de éster-sulfato, tanto aromáticos como no aromáticos, mediante división del enlace O-S, liberando fenoles y el anión sulfato, según la siguiente reacción (Burns, 1982; Tabatabai, 1994).



Los éster-sulfato comprenden entre 40 y 70% del azufre presente en los suelos (Freney, 1961). La ocurrencia de esta enzima en diferentes sistemas de suelo está correlacionada con la biomasa microbiana y la tasa de inmovilización de azufre.

Otros ejemplos de enzimas que catalizan la degradación del éster-sulfato son: alquilo, esteroides, gluco, condro, y mico sulfatasas (Germida *et al.*, 1993).

La actividad de esta enzima envuelve procesos importantes en la función del suelo tales como la descomposición y síntesis de la materia orgánica, ciclo de este nutriente y la descomposición de xenobióticos (Acosta-Martínez *et al.*, 2003).

Existe gran cantidad de microorganismos rizosféricos que son capaces de producir sulfatasas exocelulares, entre los que se destacan el grupo de las Pseudomonadales tales como *Pseudomonales putida* y *Pseudomonales aeruginosa*. En ocasiones se ha considerado como un indicador indirecto de la actividad de los hongos, ya que solo estos y no las bacterias, son los que contienen el sustrato de la arilsulfatasa.

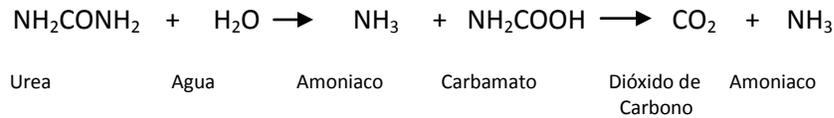
La actividad de esta enzima en el suelo disminuye marcadamente con la profundidad del suelo, ya que muestra correlación significativa con el contenido de carbono orgánico. También se encuentra correlacionada con el nitrógeno total del suelo, capacidad de intercambio catiónico y carbono asociado a la biomasa microbiana, también es afectada por metales pesados y los cambios de pH en la solución del suelo (Acosta-Martínez y Klose y Tabatabai, 2000) Las adiciones de azufre disminuyen la actividad enzimática, se ha encontrado variabilidad estacional, de manera que presenta mayores valores de actividad cuando la humedad es más alta (Paz, 2006).

## **Ureasa**

La actividad enzimática de la ureasa está relacionada directamente con el ciclo biogeoquímico del nitrógeno, como ya se mencionó el nitrógeno es un elemento esencial para todos los seres vivos pues es un componente de los aminoácidos, los ácidos nucleicos, los aminoazúcares y sus polímeros.

La ureasa está ampliamente distribuida en la naturaleza, encontrándose presente en un gran número de microorganismos, animales y plantas superiores, se cree que la mayor parte de la actividad ureasa del suelo es de origen microbiano. Encontrándose que aproximadamente el 46 % de actividad ureasa de los suelos es de origen extracelular.

La reacción química de la ureasa es de la siguiente forma: la urea se hidroliza para dar lugar a amonio y carbamato, se hidroliza nuevamente y de forma rápida para formar dióxido de carbono y una segunda molécula de amoníaco, según la siguiente reacción. Provocando la formación de amonio y un incremento del pH del suelo.



(Tomado de Tabatabai, 1994).

La ureasa es una proteína hexamérica que contiene dos iones  $\text{Ni}^{2+}$  por subunidad. Es una enzima que actúa sobre enlaces C-N peptídicos en amidas lineales. Actúa sobre la urea como sustrato (Paz, 2006).

La actividad de esta enzima está directamente correlacionada con el contenido de carbono orgánico del suelo, de forma que éste último puede explicar hasta 92% de la variación de la actividad ureasa del suelo. Sin embargo el incremento de la actividad ureasa se ha impulsado más al tipo de material orgánico que a su cantidad y está correlacionada con el contenido en carbono o en nitrógeno de la biomasa microbiana. La ureasa se encuentra absorbida en microunidades estructurales menores de 50  $\mu\text{m}$  (Paz, 2006).

Existe una correlación positiva entre el contenido de ureasa y arcilla en el suelo y negativa con el contenido de arena. En tanto que con el pH se han encontrado tanto correlaciones negativas como positivas.

## Suelos forestales

Una parte importante de los ciclos biogeoquímicos, que ayuda al reciclamiento de nutrientes se lleva a cabo en los suelos forestales. El suelo desempeña un papel esencial en el desarrollo y crecimiento de los bosques pues proporciona agua, nutrientes y un medio de sostén para los árboles y para el resto de la vegetación forestal. Los suelos derivan de un material parental de composición mineral heterogénea y esto determina en gran parte sus propiedades, que a su vez influyen tanto en la composición de la vegetación forestal como en el ritmo de crecimiento de los árboles (Pritchett, 1991).

Se distinguen cuatro horizontes en suelos forestales típicos y bien drenados en las regiones templadas (Spurr, 1982; Pritchett, 1990).

- Horizonte O (Capa orgánica): contiene tres capas que son el mantillo que está compuesto por restos muertos no alterados de plantas y animales, capa de fermentación de materia orgánica descompuesta pero que aún se puede reconocer la fuente y humificación materia orgánica muy descompuesta y amorfa.
- Horizonte A (Zona de eluviación): capa superficial del suelo mineral que es lavado por el movimiento descendiente del agua y de los ácidos orgánicos e inorgánicos.
- Horizonte B (Zona de acumulación): está caracterizada por la deposición de óxidos de hierro y aluminio, partículas de arcillas y partículas orgánicas.
- Horizonte C: material parental no intemperizado.

El insumo más significativo para el suelo forestal es la materia orgánica, la hojarasca contribuye a la acumulación de materia orgánica en el suelo y ejerce una influencia considerable en la capa mineral subyacente, así como a las poblaciones asociadas de microorganismos y de animales del suelo.

Como ya se mencionó los organismos vivos juegan un papel fundamental en la ecología de los suelos, ellos cumplen funciones complejas con respecto a la formación del suelo, eliminación de ramas caídas y hojarasca, disponibilidad y reciclaje de nutrientes, así como metabolismo y crecimiento de los árboles. Su actividad está determinada por factores del suelo tales como la humedad, temperatura, ventilación, acidez, así como la disponibilidad de nutrientes y energía. La microflora como las bacterias autótrofas, organismos heterótrofos, actinomicetos, hongos, algas, animales como los artrópodos, diferentes tipos de vertebrados, gusanos entre otros se hayan a lo largo del perfil del suelo y cada grupo ocupa un lugar determinado, esta distribución afecta de manera indirecta el número y la actividad de estos organismos, la máxima concentración se encuentra en los pocos centímetros superficiales de los suelos forestales con una rápida disminución en número de la mayor parte de los organismos a medida que aumenta la profundidad por la disminución de materia orgánica y oxígeno, además de que las estaciones del años es otro factor importante para su distribución (Pritchett, 1991).

La mayor parte de los suelos forestales tiene una escala de pH de 3.5 a 6.5 aproximadamente, los suelos donde se establecen especies de coníferas tienden a ser más ácidos que los de aquellos que sostienen a especies de árboles de madera dura, en parte debido a que las hojas de las coníferas tienden a tener menor contenido de bases. La densidad aparente de los suelos forestales varía desde 0.2 en algunas capas orgánicas hasta casi  $1.9 \text{ gcm}^{-3}$  en las arenas gruesas. Con respecto a su textura varias clases de minerales arcillosos están presentes en suelos forestales, las arcillas silicias, compuestas de moléculas de aluminio, silicio y oxígeno son preponderantes en las regiones templadas (Brady, 1974). La topografía tiene una relación directa con la composición, desarrollo y productividad del bosque, ya que afecta la

profundidad del suelo, el desarrollo del perfil, la textura y estructura de la superficie del suelo y subsuelo (Spurr, 1982).

### **Bosques Ribereños**

Los bosques ribereños (conocidos también como bosques riparios) generalmente son áreas de vegetación natural adyacentes a los cursos de agua y pueden ser definidos como la interfaz de los ecosistemas acuáticos y terrestres, son identificados básicamente por las características del suelo y sus comunidades vegetales únicas, adaptadas a inundaciones periódicas (Ceccon, 2003). Brussa y Grela (2007) describieron su estructura en tres estratos principales: un estrato inferior constituido por un tapiz herbáceo que cubre el suelo, siguiendo con un estrato intermedio dado por la vegetación de sotobosque y un estrato superior constituido por árboles de gran porte que forman un dosel continuo por medio de sus copas. Los sistemas ribereños de montaña recorren diferentes formas de relieve (cima, hombro, lomo y pie de ladera junto con el valle) conforman una “catena” caracterizada por diferentes tipos de suelo aunque provengan de un material parental semejante (Thompson y Troeh, 1982). El concepto de catena puede agrupar también, a un conjunto de comunidades vegetales contiguas ordenadas en función de algún factor del ambiente (temperatura, humedad, topografía etc.) que genere una zonación. Respecto a esto Carrete (2010) menciona que existe una relación directa entre el ancho del bosque a ambos lados del curso del agua con respecto al relieve del terreno que a su vez determina el área de inundación de la cuenca en donde se facilita el intercambio de energía y nutrientes entre el río y la llanura de inundación, y juegan un papel clave en la distribución de las plantas al afectar la dispersión de semillas, establecimiento de vegetación y la sedimentación.

El bosque ribereño puede actuar como agente transformador cuando los procesos químicos y biológicos cambian la composición de los nutrientes (Ceccon, 2003; Granados, 2006). En el caso de los suelos bien oxigenados, las bacterias y los hongos del bosque convierten el nitrógeno del escurrimiento y la materia orgánica del piso del bosque en forma de minerales, que pueden ser aprovechados por las plantas y bacterias. El bosque ribereño actúa sobre los sedimentos que son depositados, cuando el escurrimiento superficial pasa hacia otra zona del mismo bosque, tiene lugar una reducción de la velocidad de flujo gracias a la rugosidad superficial mayor y la resistencia de la vegetación. La reducción en la velocidad a su vez provoca una disminución en la capacidad de transporte de sedimentos. Si la capacidad de transporte es menor que la carga de sedimentos, ocurre su deposición en la interfaz de la zona ribereña

y el área de cultivo o pasto, quedando en el sitio todos los nutrimentos o contaminantes presentes (Herrera, 1985; Ceccon, 2003).

Las actividades del hombre sobre los sistemas ribereños, en particular en el cambio de uso de suelo, para la agricultura, ganadería, asentamientos humanos y diversas actividades, han provocado una modificación en el ambiente. La permanencia de estos ecosistemas permite la continuidad de los procesos naturales garantizando la calidad de los servicios que nos brinda el ecosistema.

Los sistemas ribereños permiten una amplia oportunidad de estudio por sus interacciones en suelo, agua, sedimentos, vegetación y fauna, por lo que el presente estudio tiene como justificación lo que a continuación se menciona:

## **JUSTIFICACIÓN**

Los bosques ribereños dentro de las cuencas juegan un papel muy importante para la salud de las mismas (equilibrio balance hídrico), ya que estas integran procesos químicos, físicos y biológicos que ayudan a mantener y restaurar el equilibrio ecológico del afluente y el de las zonas aledañas.

Las diferentes condiciones fisiográficas (exposición, altitud, y relieve), uso de suelo y grado de conservación) en el Parque Nacional Izta-Popo influyen en la fertilidad del suelo. Esta fertilidad puede evaluarse entre otros indicadores con las actividades enzimáticas, porque son sensibles a los cambios de uso de suelo, son de fácil medición y además participan en los ciclos biogeoquímicos.

Por lo que conocer la fertilidad edáfica de ambientes ribereños en función del N-total y  $\text{NH}_4^+$  soluble, y S-disponibles del suelo derivados de la actividad enzimática, es de gran importancia porque contribuye al diagnóstico del estado de las Cuencas de México y del alto Balsas en el Parque Nacional Izta-Popo y sus zonas de influencia.

## HIPÓTESIS

Las actividades ureasa y arilsulfatasa del suelo que contribuyen a su fertilidad en ambientes ribereños liberando amonio y sulfatos por hidrolisis enzimática, es afectada por cambio de uso de suelo y la altitud, factor sobre el que interviene la temperatura, modificando los contenidos de MOS en sistemas ribereños el Parque Nacional Izta-Popo.

## OBJETIVOS

Objetivo general.

- Evaluar la contribución de la actividad de las enzimas Ureasa y Arilsulfatasa, en la fertilidad de suelos ribereños de sitios con diferente uso de suelo en un gradiente altitudinal en las cuencas del Alto Balsas y de México en el Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia.

Objetivos particulares

- Determinar las actividades Arilsulfatasa y Ureasa del suelo y su contribución en la hidrólisis de materia orgánica para liberar amonio y sulfatos respectivamente, en suelos ribereños de sistemas lóticos en ecosistemas de montaña.
- Evaluar la relación existente entre la actividad de enzimas de suelos ribereños con la concentración de  $\text{SO}_4^{-2}$  extractables (HCL 0.025N –  $\text{NH}_4\text{-F}$  0.03N) y  $\text{NH}_4^+$  soluble del suelo.
- Relacionar las actividades Arilsulfatasa y Ureasa con otros indicadores de fertilidad edáfica como la materia orgánica, pH y densidad aparente.

### Zona de estudio

El Parque Nacional Izta-Popo forma parte del sistema montañoso Eje Volcánico Transversal, que separa las cuencas de México, Puebla y Morelos, donde también se localizan los acuíferos más importantes del país, y se distingue por ser el parteaguas origen que divide las aguas tributarias del Océano Atlántico (Golfo de México) de las aguas tributarias del Océano Pacífico, formando dos de las cuencas más importantes del país, el Valle de México y el Balsas.

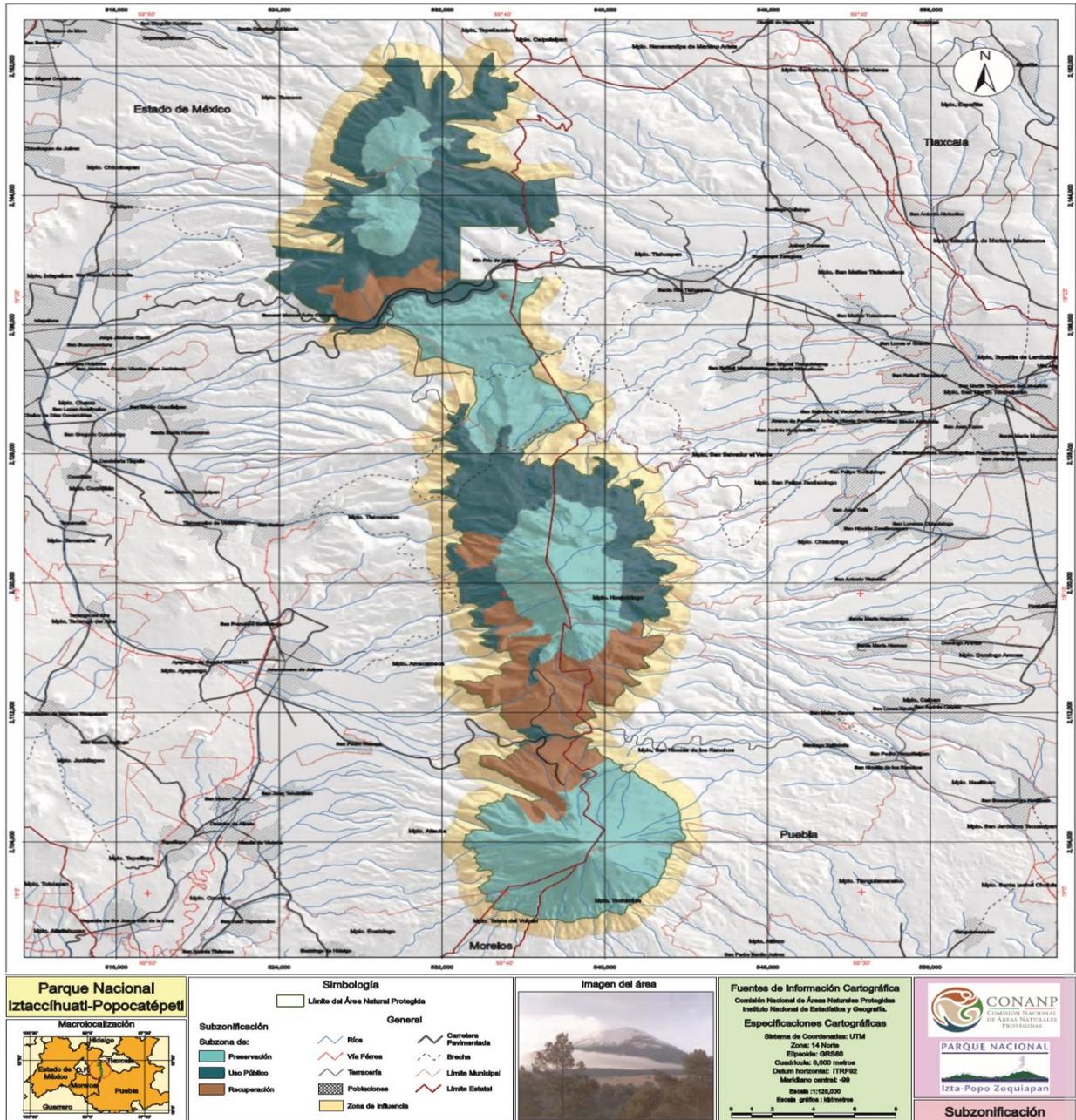


Figura 4. Parque Nacional Izta Popo (CONANP, 2014).

Las fuentes de agua emanan principalmente por el deshielo de los glaciares del Iztaccíhuatl y del Popocatepetl (Izta-Popo) y de la precipitación pluvial abundante en la región, arriba de los 1,000 mm anuales, los ecosistemas de la Sierra Nevada realizan los procesos que permiten la recarga de acuíferos y mantos freáticos que abastecen buena parte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, del Valle de Chalco, del Valle de Puebla-Tlaxcala y del Valle Cuautla-Cuernavaca (CONANP, 2014).

## Suelos

El material parental de los suelos está compuesto por rocas ígneas extrusivas de pómez, acumulación de cenizas volcánicas de diferentes etapas de actividad volcánica y por sedimentos de origen volcánico.

La superposición de capas de tefras y cenizas, además de los efectos del intemperismo hídrico y eólico y del clima, ejercen efectos diferentes sobre los procesos de formación de los suelos característicos de esta región que son andosoles, los cuales debido a su composición y a la acción combinada de estos factores pueden ser vítricos, húmicos, mólicos y ócricos (CONANP, 2014).

De acuerdo con la clasificación de la WRB de la FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) las unidades de suelo presentes en el área del parque son:

Litsoles. Suelos someros con menos de 0.1 metros de espesor, formados sobre tepetates y que conservan las características del material parental. Generalmente son suelos poco desarrollados, debido a la percolación del agua que impide el establecimiento de algún tipo de vegetación, lo que aunado al clima presente a altitudes mayores de 4 mil metros sobre el nivel del mar dificulta el desarrollo del suelo. Según la WRB este tipo de suelos están incluidos dentro del grupo de leptosoles.

Regosoles. Del griego *rhegos*, manto. Son suelos formados a partir de material suelto como arena, grava o piedra, en el parque se localizan a altitudes por debajo de los tres mil novecientos m sobre el nivel del mar y normalmente son pobres en contenido de materia orgánica y nutrientes.

Andosoles. Del japonés *an*, oscuro y *do*, suelo. Se derivan de cenizas volcánicas recientes, por lo que son suelos ligeros con alta retención de nutrientes, así como con un alto contenido de materia orgánica; y la proporción de vidrios volcánicos presentes, pueden formar andosoles húmicos que se presentan en áreas forestales poco alteradas; también pueden formar andosoles vítricos en zonas de vegetación de coníferas cuando presentan más del 60 por ciento de vidrios, cenizas volcánica y texturas gruesas.

Cambisoles. Del latín *cambiare*, cambiar. Son suelos mejor desarrollados, con horizontes A y B bien definidos, pero pobres en contenido de nutrientes; presentan potencial para el desarrollo forestal con adecuadas prácticas de manejo para la conservación de suelo y captación de humedad.

Fluvisoles. Del latín *fluvius*, río. Son suelos formados en cañadas, escurrimiento y zonas de depósitos de material reciente; de textura gruesa, su fertilidad es baja debido al escaso contenido de nutrientes.

## Clima

Debido a su topografía y ubicación, el parque tiene una variedad de climas que van del templado húmedo a los climas fríos y muy fríos; la temperatura disminuye con la altura a razón de 0.68 °C por cada 100 metros (CONANP, 2014).

Se presenta en el Cuadro 3 la clasificación climática basada en las modificaciones que realizó la maestra Enriqueta García al sistema de clasificación climática de Köppen.

Cuadro 3. Sistema de clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García. Programa de Manejo Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl, 2013.

Estación	Clave climática	Descripción
Río Frío	C (w'2) (w) (b') ig	Clima templado, subhúmedo, con lluvias en verano, con temperatura media del mes más frío menor a 18°C, superior a -3°C; precipitación del mes más húmedo es en la mitad del año en la que se encuentra el verano, 10 veces mayor que la del mes más seco; la precipitación del mes más seco es menor de 40 milímetros, la precipitación anual es mayor que la que constituye el límite de los climas secos B y menor que el límite de los climas C (m).
Chalco	C(m) (w) b(e) g	Clima templado, húmedo, con lluvias de verano; con temperatura media anual entre 12 y 18°C y temperatura del mes más frío de 11.2°C; la precipitación media anual es de 659.3 milímetros, la precipitación del mes más seco mayor de 40 milímetros; el porcentaje de lluvia invernal menor de 5 % de la anual. El verano es fresco y largo, el mes más cálido presenta temperaturas de 18.4°C; el mes más caliente es mayo.
Tlahuapan	C (w' 2) big	Clima templado, pero el más húmedo de los subhúmedos, una temporada lluviosa en verano y otra en invierno, cuyo cociente P/T (precipitación/temperatura) es mayor de 55. La precipitación media anual es de 970.6 milímetros. La temperatura media anual es de 14.6°C, la temperatura del mes más frío es de 11.6°C. El verano es fresco y largo; la temperatura media del mes más caliente es de 22°C. La oscilación térmica es de 4.7°C y el mes más caliente se registra antes de junio.

San Rafael	C(w2) (w) big	Clima templado, subhúmedo, con lluvias de verano, temperatura media anual de 13.2°C, la temperatura del mes más frío menor de 10.9°C y la del mes más cálido de 15.4°C. La precipitación anual de 1092 milímetros, febrero es el mes más seco y julio el más húmedo con 228 milímetros de precipitación; el porcentaje de lluvia invernal de 3.57 %. La relación entre temperatura y precipitación es de 82.7 la temperatura media anual se encuentra entre los 12°C y los 18°C.
San Pedro Nexapa	Cb (w) kig	Clima templado subhúmedo con lluvias de verano; temperatura media anual de 13.5°C, temperatura del mes más frío de 11.4°C en diciembre y enero, el mes más cálido de 15.9°C en mayo. Precipitación anual es de 910 milímetros, con un porcentaje de lluvia invernal de 5 %. La relación entre temperatura y precipitación es de 67.1; con una oscilación térmica de 4.5, se le considera un clima isotermal, semifrío, con verano fresco.
Amecameca	Cb (w2) (w)' gw''	Clima templado subhúmedo, con lluvias de verano, cuya temperatura media anual es de 14°C; enero el mes más frío con 10.8°C y mayo el más cálido con 16.2°C. Precipitación media anual de 928 milímetros; el mes más seco es febrero con una precipitación de 6.9 milímetros, el más húmedo septiembre con una precipitación de 185.6 milímetros. Porcentaje de lluvia invernal de 3.4 % y la relación precipitación-temperatura es de 66.3. Oscilación térmica de 5.4, se le considera templado con verano fresco largo.
Tetela del Volcán	Cb (m) (w) ig	Clima templado húmedo con lluvias en verano, temperatura media anual de 17.2°C, diciembre es el mes más frío con 15.6°C, mayo el más cálido con 19.8°C. La precipitación media anual es de 1885 milímetros, febrero es el mes más seco recibe una precipitación de 1.3 milímetros y julio es el mes más húmedo con 368.5 milímetros de precipitación. La relación precipitación- temperatura es de 109.6; se le considera templado con verano fresco largo y por la precipitación como húmedo.
Huayatlaco	Cc (w2) (w) iw''	Clima semifrío húmedo con lluvias de verano. Temperatura media anual de 7.7°C, mes más frío enero, con temperatura de 6.4°C y el más cálido abril con temperaturas medias de 9.2°C; oscilación térmica de 2.8°C; precipitación media anual de 1186 milímetros, el mes más seco en febrero, con una precipitación de 13 milímetros y el más húmedo septiembre con 203 milímetros. La relación precipitación-temperatura es de 154 y el porcentaje de lluvia invernal de 4.8.
		ETHw Clima frío, temperatura media anual de entre -2°C y 5°C; mes más frío con 0°C y el más cálido con 6.5°C, EFHw
		Clima muy frío, temperatura media anual menor de -2°C y la caliente menor de 0 °C.

## Hidrología

De acuerdo con el Ordenamiento Ecológico del Volcán Popocatepetl, la Sierra Nevada se divide en cuatro subcuencas, estas son: en el flanco occidental de la Sierra Nevada, la subcuenca denominada Chalco- Texcoco, por ser los sitios de los antiguos lagos que llevan los mismos nombres, donde fluyen las aguas provenientes de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Telapón y Tláloc. Del lado oeste y suroeste reunimos dos subcuencas, la del río Cuautla y la del Yautepec, ambas tributarias de la cuenca del río Balsas; se le han llamado la subcuenca de Cuautla-Yautepec. En la parte oriental tenemos dos

subcuencas, ambas también pertenecientes a la gran cuenca del río Balsas. Al norte, la subcuenca del Río Atoyac; al sur de este flanco oriental, la subcuenca del río Nexapa.

Hacia la parte occidental desciende una gran cantidad de arroyos que desemboca al norte de la Sierra Nevada en la antigua zona lacustre de la subcuenca Chalco y Lago de Texcoco, los cuales, a través del Gran Canal del Desagüe son tributarios del río Tula y éste a su vez, del río Pánuco que desemboca en el Golfo de México. Hacia el sur de la Sierra Nevada, las corrientes que descienden contribuyen a formar el Río Cuautla que alimenta la subcuenca del Río Nexapa tributaria de la cuenca del Balsas. En la vertiente oriental, los escurrimientos del macizo montañoso conforman la subcuenca del Atoyac, tributaria también de la cuenca del Balsas, misma que desemboca en el Océano Pacífico (CONANP, 2014).

### **Vegetación**

El Parque Nacional es el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña al centro del país. Se establecen asociaciones vegetales de transición entre *Pinus* sp y *Abies* sp., lo que implica que son zonas de amplia diversidad florística y ecológica conformando rodales mixtos de *Pinus ayacahuite* con *Abies religiosa*. En esta zona de ecotono también es frecuente la asociación de *Pinus montezumae* con *Pinus hartwegii*. En estos bosques el dosel no es muy cerrado, lo que permite el establecimiento y desarrollo de diversas especies arbóreas, arbustivas y herbáceas. Entre los géneros mejor representados pueden citarse: *Pinus* sp, *Senecio* sp, *Ribes* sp, *Muhlenbergia* sp, *Agrostis* sp, *Lupinus* sp y *Festuca* sp. Los suelos son típicamente profundos, bien drenados pero húmedos todo el año. Muchos sitios se hallan limitados a cañadas o barrancas más o menos profundas que ofrecen un microclima especial. Su importancia radica no solo en la extensión de bosques en buen estado sino en la diversidad de su flora y fauna (CONANP, 2014).

El Parque Nacional Izta-popo es de gran importancia ya que es una fuente importante para los servicios ambientales, ya que esta es la principal proveedora de la captura de carbono, la regulación del clima, la generación de oxígeno, la asimilación de diversos contaminantes, la protección de la biodiversidad, refugio de fauna silvestre, belleza escénica, la provisión de agua y retención de suelo que evita erosión e inundaciones. Conocer su estado es indispensable para su manejo y conservación (CONANP, 2014).

Los bosques de pino del parque se caracterizan por ser bosques maduros en buen estado de conservación y con zonas importantes de regeneración natural. Se presenta una alta densidad sobre todo en las zonas aledañas al Popocatepetl, en gran parte por la restricción de acceso al volcán y en la

zona de las cañadas gracias a condiciones microclimáticas, al bajo impacto de actividades antropogénicas, y en la zona de Zoquiapan. En el siguiente cuadro se presentan las comunidades vegetales.

Cuadro 4. Comunidades vegetales y especies dominantes correspondientes con gradiente altitudinal del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl (Programa de Manejo Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl 2014).

Comunidades vegetales		
Bosque de coníferas		Pastizal
Pastizal Pino-Abeto 3 mil a 3 mil 700 metros sobre el nivel del mar	Pino 3 mil 400 a 4 mil msnm	Zacatonal y pastizal alpino y subalpino 3 mil 500 a 4 mil 350 metros sobre el nivel del mar
<i>Pinus ayacahuite</i> , <i>Pinus montezumae</i> , <i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>Eupatorium pazcuarensis</i> , <i>Senecio platanifolius</i> .	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Ribes ciliatum</i> , <i>Lupinus montanus</i> , <i>Festuca</i> spp., <i>Calamagrostis</i> spp., <i>Acaena elongata</i> .	<i>Festuca</i> spp., <i>Calamagrostis tolucensis</i> , <i>Muhlebergia quadridentata</i> , <i>Agrostis tolucensis</i> , <i>Juniperus monticola</i> .

## MÉTODOS

- Delimitación de la zona de estudio y muestreo.

Los sitios estudiados se ubicaron en sistemas ribereños en el Parque Nacional Izta- Popo y sus zonas de influencia hacia las Cuencas de México y del Alto Balsas a través de un gradiente altitudinal, los cuales fueron elegidos con apoyo de cartas topográficas, siendo considerados por su diferente uso de suelo.

Se seleccionaron 21 sitios adyacentes a arroyos y ríos permanentes de alta, mediana montaña y pie de monte cada uno con propiedades diferentes. Se realizó la caracterización ecológica para cada sitio y como diseño de muestreo se delimitaron transectos de 30 m a lo largo del río y 7 m de ancho en ambos lados del río (420 m<sup>2</sup> por sitio de estudio) para obtener como mínimo seis submuestras y así formar una muestras compuesta.

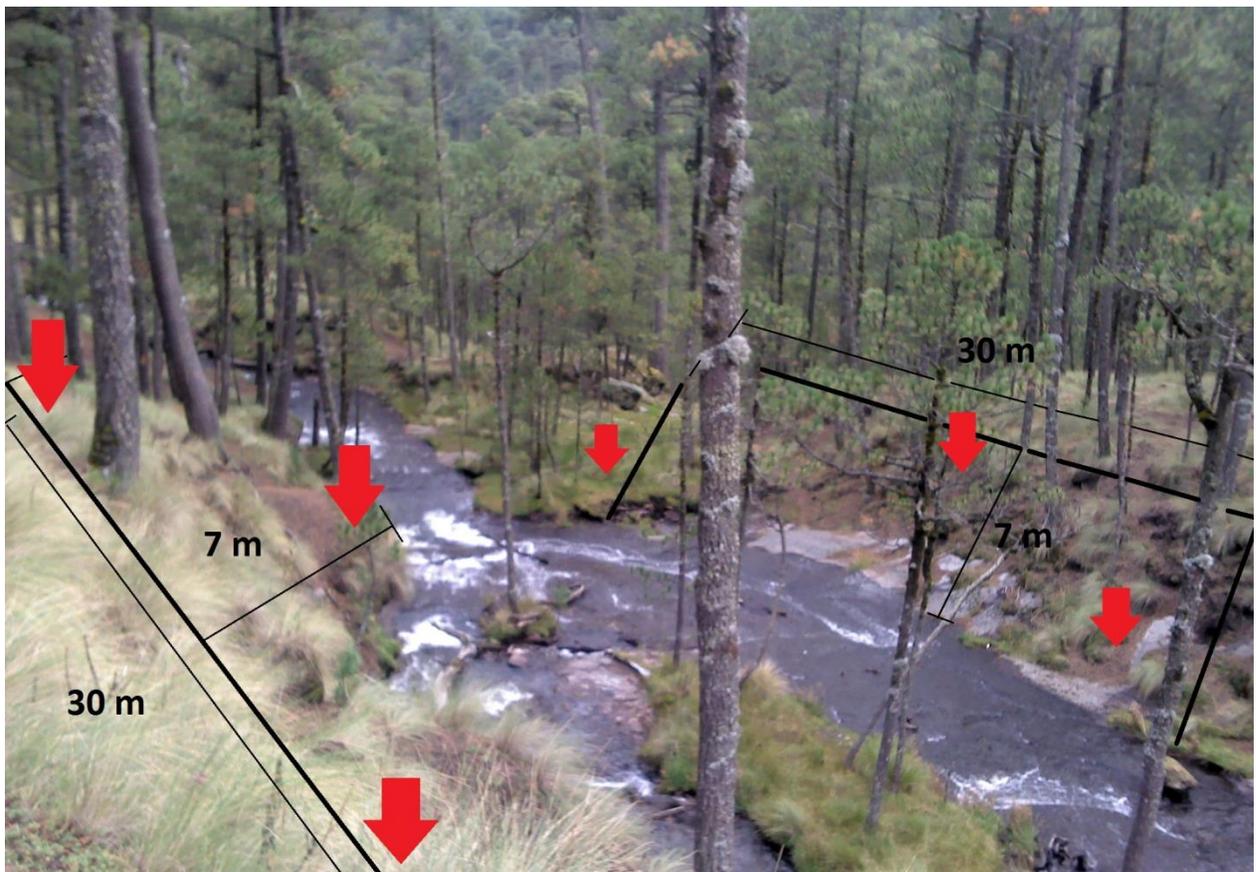


Figura 5. Modelo de muestreo para cada sitio visitado.

Se realizó la caracterización ecológica (Figura 6) registrando coordenadas geográficas y altitud con un GPS GARMIN etrex-vista (2000), porcentaje de humedad ambiental y temperatura ambiente con un Higró-Thermometro UNIT-T UT330, se tomó la exposición del río y se determinó la pendiente con un Brújula-clinometro Brunton, se observó la vegetación dominante y los estratos vegetales además del tipo de material geológico predominante (Cruz-Flores y Guerra-Hernández, 2014).



Figura 6. Caracterización ecológica de sistemas ribereños

Para la obtención de las muestras de mantillo y capa de fermentación se delimitaron cuadrantes con marcos de madera de 25 cm × 25 cm, tomando seis submuestras para cada sitio formando muestras compuestas, que se almacenaron en bolsas de papel debidamente etiquetadas (fecha, número de muestra y sitio además de anotarse en la libreta de campo el espesor del mantillo).

Para el análisis de propiedades químicas y físicas del suelo se tomaron seis submuestras de 0 a 20 cm de profundidad con las que se formaron las muestras compuestas para cada sitio (Figura 7), se colocaron en bolsas de plástico debidamente etiquetadas (fecha, número de muestra y sitio).



Figura 7. Muestreo de mantillo, capa de fermentación y suelo.

Para determinar la actividad enzimática del suelo se tomaron seis submuestras de 0 a 10 cm de espesor que se colocaron en bolsas de plástico de cierre hermético y se pusieron en refrigeración a 4 °C hasta el momento de conformar las muestras compuestas y realizar su análisis.

- Laboratorio.

Las muestras de mantillo fueron pesadas después de ser recolectadas y puestas a secar en una estufa a 60° C hasta obtener peso constante, para calcular los gramos de carbono y porcentaje de humedad.

La densidad aparente y porcentaje de humedad del suelo se obtuvo mediante el método del cilindro de volumen conocido y determinando la masa del suelo seco contenido en los tubos.

Las muestras de suelo de 0 a 20 cm y la capa de fermentación se secaron al aire, se tamizaron con una malla de 2 mm, y se colocaron en botes de plástico herméticos etiquetados hasta su análisis.



Figura 8. Secado del suelo y reserva de la muestra.

Se midió el pH (1:2) y la conductividad eléctrica (1:5) con un potenciómetro Conductronic pH120. El análisis de materia orgánica se llevó a cabo por el método de Walkley y Black, nitrógeno total por el método semimicro Kjeldahl, se extrajo el Azufre con la solución de Bray (HCL 0.01 N- NaF 0.03 M) y se determinó por el método turbidimétrico de sulfato de bario.

El análisis de actividad enzimática ureasa se realizó por el método de Tabatabai & Bremner, 1972 y la arilsulfatasa por el método de Tabatabai & Bremner, 1970. Todos y cada uno de estos parámetros fueron realizados por triplicado.

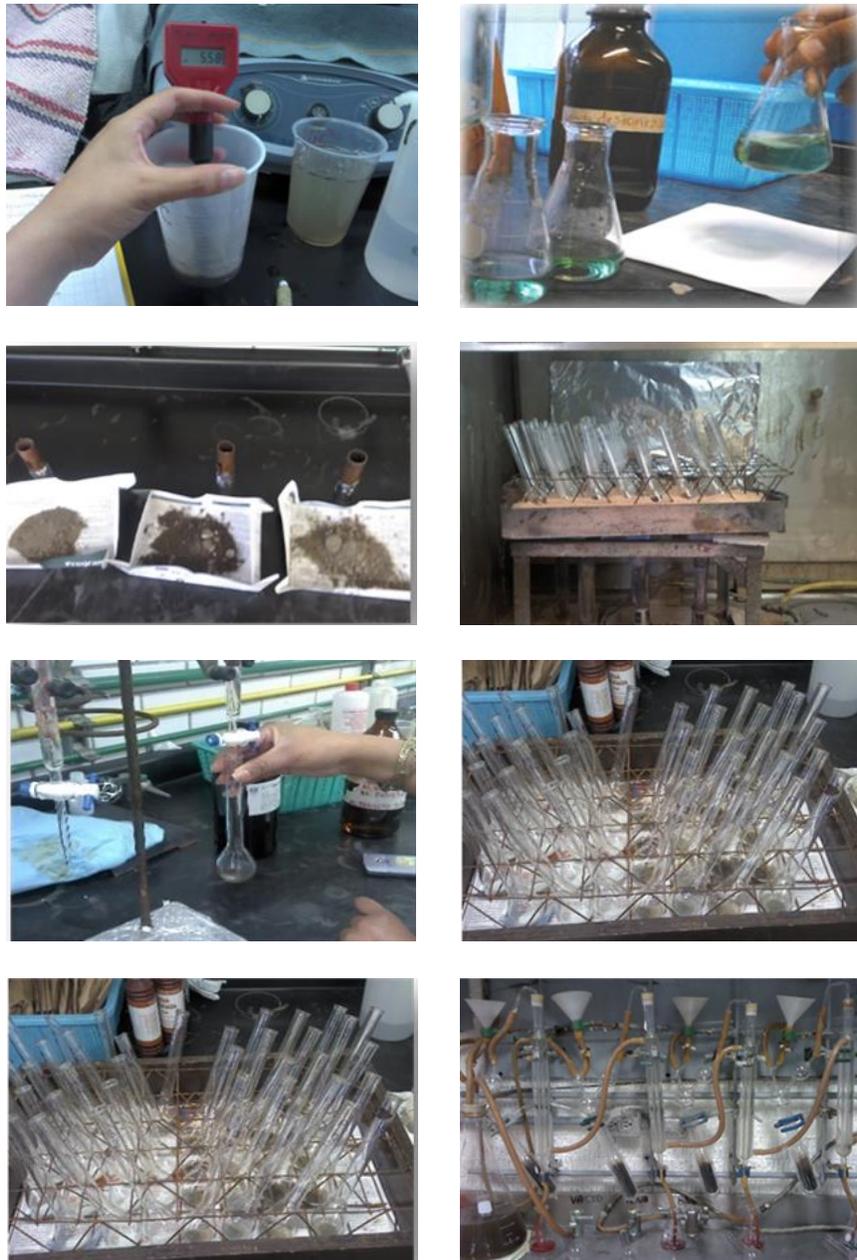


Figura 9. Análisis de laboratorio: propiedades físicas, químicas y bioquímicas de suelo.

### Análisis estadístico

Con el programa SAS (Statistical Analysis System) se hicieron correlaciones simples entre las propiedades físicas y químicas del suelo incluyendo la actividad enzimática Arilsulfatasa y Ureasa y la disponibilidad de iones  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{SO}_4^{-2}$  del suelo y capa de fermentación. Se realizó también un análisis de varianza (modelo lineal generalizado) de dos vías para evaluar los efectos de altitud y uso de suelo sobre actividades arilsulfatasa y ureasa y liberación de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{SO}_4^{-2}$  y pruebas de comparación de medias (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 10 muestra 21 sistemas ribereños de ríos permanentes, de los cuales, 18 se encuentran en la Cuenca del Alto Balsas, (municipios de Calpan, Huejotzingo, Iztapaluca, San Felipe Teotlalcingo, San Rafael Tlanalapa Santa Rita Tlahuapan, y Tochimilco) y tres sobre la Cuenca de México (municipio de Amecameca). Todos los sitios estudiados de esta investigación consideran los diferentes usos de suelo que están distribuidos en cuatro intervalos altitudinales del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia.

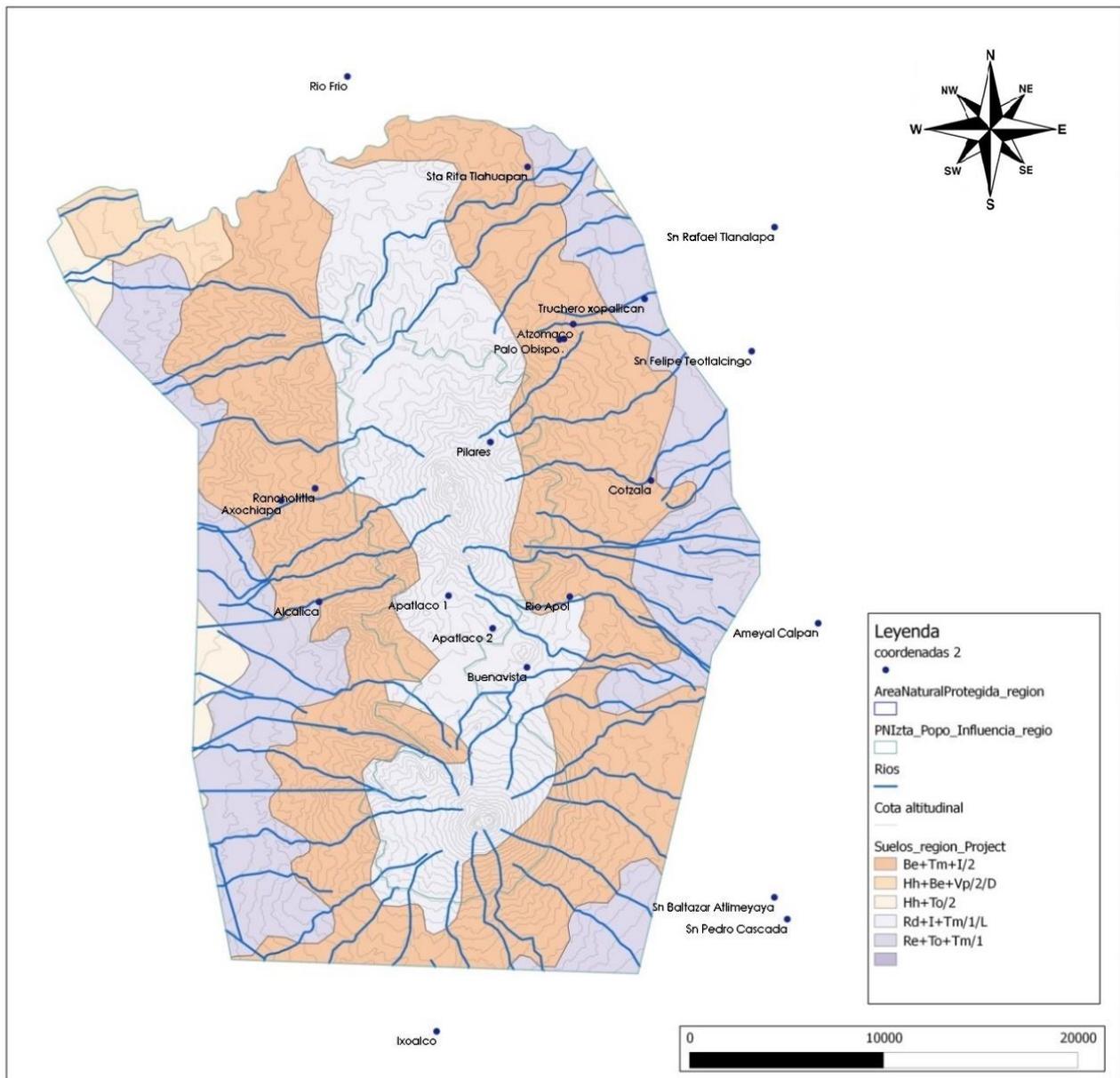


Figura 10. Ubicación de los sitios de muestreo, ríos y grupos de suelo (elaborado en SIG Quantum Gis 1.7.4, datos vectoriales INEGI 2000).

Con la finalidad de lograr un mejor análisis, contraste y discusión de las características y propiedades de los diversos sitios, estos se agruparon en intervalos altitudinales definidos en general por su semejanza en el uso de suelo y por sus homogéneas condiciones ecológicas y características particulares en cada intervalo altitudinal. El cuadro 5 presenta los intervalos altitudinales en los que fueron agrupados los sitios de estudio además de mostrar las actividades y uso de suelo predominantes. Algunos de los sitios pueden ser considerados como transición entre un intervalo altitudinal aunque algunos comparten características ecológicas o uso de suelo semejantes.

Cuadro 5. Uso de suelo dominantes por intervalo de altitud

Uso de suelo	Intervalo altitudinal (m)	Número de sitios
Urbano, Agrícola, Pecuario	2188-2400	6
Acuícola, Forestal	2546-2928	7
Forestal, Ecoturístico	3000-3500	5
Forestal	3500-4000	3

### Caracterización ecológica

Por el amplio intervalo altitudinal que considera la investigación (2000-4000 m  $\approx$ ) se encontraron sitios con diferentes tipos de régimen climático, microclimas y una gran diversidad de especies vegetales de bosques templados en los sistemas ribereños del PNIP (Cuadro 6). El clima va de templado húmedo en altitudes de 2000 a 3000 climas fríos y muy fríos por arriba de 3000 m (CONANP, 2013) es el principal responsable de esta diversidad, lo que influye en las condiciones diferentes en cada uno de los sitios respecto a temperatura, humedad y precipitación. Estos factores climáticos tienen un efecto directo sobre el crecimiento vegetal e influyen específicamente en las características de la biota en general (Whittaker, 1970). Lo anterior también fue mencionado por Ward *et al.* (2002) citado en Acosta (2008), quienes indicaron que las características presentes en estos ecosistemas a diferente gradiente altitudinal, están asociadas con los cambios en las variables climáticas, que afectan la estructura y composición de la vegetación ribereña y por lo tanto la capacidad de amortiguamiento en cada sitio. Se observó que el establecimiento de la vegetación también estuvo determinado por factores topográficos y edáficos. Como la pendiente, que juega un papel importante en la capacidad de retención de agua y en la sensibilidad frente a la erosión, la exposición de ladera que influye en la cantidad de radiación recibida, la profundidad del suelo, su porcentaje de humedad, su capacidad de infiltración, etc.

El Cuadro 6 muestra el resumen de la caracterización ecológica de cada sitio; su ubicación geográfica, tipo de vegetación más representativa, datos del relieve como la pendiente del terreno y las condiciones climáticas (temperatura y humedad ambiental prevaletientes durante el estudio).

Cuadro 6. Caracterización ecológica de los sitios de estudio del Parque Nacional Izta-Popo.

Cuenca	Sitio	*Uso de suelo	Altitud m	Coordenadas UTM		Vegetación	Pend. %	Temp€. °C	Hum€. %
				Longitud (W) _____m_____	Latitud (N)				
A	San Pedro la Cascada	1	2188	555107	2098092	Bosque de pino-encino cultivos de haba, avena y forraje	6.2	11.5	9.4
A	San Baltazar Atlimeyaya	1	2149	554440	2099221	<i>Salix babylonica</i>	8.2	11.9	69.4
A	San Rafael Tlanalapa.	1	2272	554450	2133872	<i>Garrya sp.</i> , <i>Cupressus sp.</i> , <i>Alnus sp.</i> ,	9.8	10.7	60.6
A	Ameyal Calpan.	1	2351	556698	2113392	<i>Buddleja sp.</i> , <i>Cestrum sp.</i> , <i>Quercus sp.</i> , <i>Salix sp.</i> , <i>Clethra sp.</i>	17.7	13.8	50.4
A	San Felipe Teotlalcingo.	1	2389	553271	2127456	<i>Clethra sp.</i> , <i>A. xalapensis.</i>	2.0	19.3	37.1
A	Ixoalco.	1	2400	537034	2092290	<i>S. elegans</i> , <i>Salix sp.</i> , <i>Alnus sp.</i> , <i>Clethra sp.</i> , <i>Cupressus sp.</i>	6.0	12.9	65.4
A	Truchero. Xopallican.	2	2546	547755	2130162	<i>Quercus sp.</i> , <i>Q. crassipes</i> , <i>Q. crassifolia</i> , <i>A. jorullensis.</i>		14.2	71.2
A	Santa Rita Tlahuapan.	2	2724	541723	2136988	<i>Cupressus sp.</i> , <i>P. patula</i> , <i>A. religiosa</i> , <i>Alnus sp.</i> ,	3.1	11.0	35.5
A	Atzomaco.	2	2744	544073	2128859	<i>S. angulifolius</i> , <i>Tagetes sp.</i> <i>P. teocote</i> , <i>Garrya sp.</i> , <i>Baccharis sp.</i> , <i>Alnus sp.</i> , <i>Cupressus sp.</i> , <i>A. xalapensis.</i>	46	15.6	72.2

A	Cotzala.	2	2809	548086	2120773	<i>P. ayacahite,</i> <i>S. elegans,</i> <i>P. pseudosrobus,</i> <i>Cupressus sp.,</i> <i>A. jorullensis,</i> <i>S. angulifolius,</i> <i>Senecio sp.</i>	28.0	31.0	
A	Palo Obispo río.	2	2821	543364	2128064	Bosque de pino-encino,	23.8	11.3	70.5
B	Alcalica.	2	2830	530974	2114498	<i>P. pseudoastrobus</i> <i>Senecio procumbens</i> <i>Eupatorium sp.</i>			
A	Zoquititla.	2	2928	543599	2128094	Bosque de pino-encino, <i>P. pseudoastrobus,</i> <i>A. religiosa.</i>	29	13.2	89.0
B	Axochiapa.	3	3019	529030	2119739	Bosque de encino, Buddleja sp. <i>P. ayacahuite,</i> <i>A. religiosa,</i>			
A	Río Apol.	3	3118	543897	2114768	<i>S. elegans,</i> <i>S. angulifolius,</i> <i>Cestrum sp.,</i> <i>Asplenium sp.</i>	12	14.6	76.9
A	Ejido Rio Frio.	3	3166	532439	2141662	Bosque de pino-encino <i>S. angulifolius,</i> <i>Baccharis sp.</i>	34	9.8	53.9
B	Ranchotitla.	3	3300	530775	2120366	<i>A. religiosa,</i> <i>E. glabratum,</i> <i>P. rachichleana,</i> <i>S. angulifolius.</i>	12	17	47
A	Buenavista.		3360	541690	2111115	<i>P. hartwegii,</i> <i>Salix sp.,</i> <i>S. aronicoides,</i> <i>Lupinus sp.,</i> Zacatonal.	10.7	15.0	38.7
A	Apatlaco 2	4	3646	539927	2113131	<i>P. hartwegii,</i> <i>Muhlenbergia sp.,</i> Rosa de los volcanes.	15	16.0	30.4
A	Apatlaco 1	4	3912	537650	2114816	Zacatonal Montano, <i>P. hartwegii,</i>	35.5	12.7	32.7
A	Pilares	4	4059	539805	2122760	Zacatonal, <i>P. hartwegii,</i> <i>L. montanos,</i> <i>C. monticula.</i>	9	12.5	65.0

A= Cuenca del Alto Balsas, B=Cuenca De México

\*Uso de suelo; 1=Urbano, Agrícola y Pecuario

2=Acuícola y Forestal

3=Ecoturístico y Forestal

4=Forestal

Pend=pendiente Temp. €=temperatura, Hum €= humedad. €al momento del muestreo

Los sitios ribereños ubicados en el primer intervalo altitudinal son los más alejados del Parque Nacional y así más cercanos a núcleos urbanos, fueron 6 sitios en la Cuenca del Alto Balsas y corresponden a la zona de influencia del PNIP (Figura 10) los cuales representan zonas urbanas, terrenos con actividades agrícolas y pecuarias donde se observa un impacto negativo sobre los sistemas ribereños como contaminación de agua y suelo, erosión edáfica y marcada disminución de la cobertura vegetal. Las formas del relieve varía de relieves cóncavos a planos con pendientes de ligeras a poco inclinadas por lo que los terrenos tienen aptitud para las actividades agrícolas (Cuadro 6). Aunque aún se encontraron fragmentos de bosque prístino, éste es invadido por algunas especies de vegetación secundaria como *Alnus* sp. que predomina en estos sitios, y como una especie oportunista es indicadora de perturbación (Rzedowski *et al*, 2005).

Dentro del segundo intervalo altitudinal (Cuadro 5) se estudiaron siete sitios que mostraron mayor densidad de especies vegetales sobre las riberas de los ríos (Cuadro 6), observando esta condición ambiental tanto en la Cuenca del Alto Balsas (Este) como en la Cuenca de México (Oeste) del Parque. Ya en estos niveles de altitud el relieve fue cóncavo en 4 sitios y convexo en 3 sitios considerando los taludes laterales adyacentes al río, pero con pendientes casi planas a poco escarpadas en los suelos del lecho de los ríos. Aunque en este intervalo de altitud, los sitios muestran menores efectos por presión antrópica, se observó en la mayoría de ellos diferentes intensidades en actividades económicas como captación de agua, ecoturismo, producción piscícola, aprovechamiento de especies forestales y no forestales, etc., que afectan a los sistemas ribereños debido principalmente a que algunos sitios son manantiales de los que la gente y poblaciones se abastecen de agua por lo que realizan entubamientos, represamientos y desviación de los cauces para el abastecimiento de agua de riego a la zona de cultivos o suministro de agua potable en algunas localidades.

En el tercer intervalo altitudinal se estudiaron cinco sitios ribereños. Se observó en ellos una alta densidad de especies de coníferas que con su mayor abundancia y diversidad muestra un mejor estado de conservación de los sistemas ribereños (Acosta, 2008). La forma del relieve en estos sitios fueron concavos y terrazados, con pendientes en los suelos de los lechos del río consideradas casi planas ( $\leq 10\%$ ). El ecoturismo es la principal actividad económica que se realiza en estos sitios.

Dentro del siguiente y último intervalo altitudinal se estudiaron tres sitios ribereños ubicados a mayor altitud, los cuales al estar protegidos por la CONANP cobran mayor valor respecto a los servicios ecosistémicos que ofrecen los sitios de menor altitud (< de 3600 msnm), en donde el uso de suelo tiene un fin ecológico benéfico para la vida en general, principalmente: provisión de agua, captura de carbono, regulación del clima, generación de oxígeno y asimilación de diversos contaminantes, protección de la

biodiversidad, retención de suelo, refugio de fauna silvestre y belleza escénica (CONANP, 2013). La vegetación predominante que se encontró, fueron especies de *Pinus hartwegii*, especie resistente a condiciones adversas como bajas temperaturas y en ocasiones escasez de agua (Hernández *et al.*, 2005) y zacatonal montano. Almeda (1994) menciona que estas especies se desarrollan encima del límite altitudinal de los bosques de coníferas de los 3800 a los 4500 m ocupando regiones donde existen drásticas fluctuaciones de temperatura, alta radiación ultravioleta y disponibilidad limitada de nutrientes del sustrato. Las pendientes en estos sitios fueron de inclinadas a escarpadas, con una forma de terreno predominantemente cóncavo.

A continuación se presenta un ejemplo representativo de la descripción ecológica de sitios en cada intervalo altitudinal.

#### San Felipe Teotlalcingo. Caso: Intervalo altitudinal 1 (2000-2500 m)

Se ubica a una altitud de 2382 m que por la tipología en altitud se clasifica como media. Este sitio es representativo de otros cinco sitios estudiados en este intervalo altitudinal., se localiza geográficamente en las coordenadas UTM 540289 m W y 2126690 m N. El uso de suelo es agrícola donde los cultivos principales son maíz y árboles de pera. El manantial que nace en este sitio es aprovechado para el riego de los cultivos, y es derivado hacia otras parcelas, la orientación del arroyo es de oeste a este. Debido al uso de suelo, el terreno fue modificado en ligeras terrazas que siguen las curvas de nivel y son casi planos con una pendiente de 1.8 %. El tipo de suelo es fluvisol con 12 y 65 cm de profundidad, presentando principalmente suelos arenosos limosos a lo largo del perfil del suelo. La forma del relieve es convexa. Gracias al curso del arroyo fue posible observar rocas de tipo riolitas y dacitas. El pH del suelo que se observó fue de 5.7. Las pruebas no muestran presencia de aluminio activo, a la prueba de alofano. La temperatura ambiental fue de 8.3°C con una humedad de 50.2%. La vegetación ribereña fue totalmente eliminada del lado del manantial para establecer los cultivos, pero a lo largo del cauce aún se pueden encontrar árboles de capulín *Prunus salicifolia* y tejocote, y alejado del sitio de muestreo se encontraron *Clethra* sp. y *Garrya* sp., sobre el cauce remansos del río en algunas en ciertas zonas se encontró vegetación sub acuática.

#### Ixoalco Caso: Intervalo altitudinal 2 (2500-3000m)

Este sitio tiene un río que se encuentra al lado de un sistema de producción de truchas, con las coordenadas UTM 537034 m W y 2092290 m N, se encuentra a una altitud media de 2400 m snm, la vegetación observada fue arbórea y arbustiva, con *Salix elegans*, *Salix* sp., *Alnus* sp., *Clethra* sp. y

diversas especies de helechos, además de observar como especie de reforestación a *Cupressus* sp.. La humedad registrada fue de 73% con una temperatura de 15.8 °C. El material geológico encontrado fueron riolitas y andesitas, la profundidad del suelo fue de 10 a 30 cm, con textura de arena media a gruesa, el pH medido con potenciómetro fue de 4.3 y con un potenciómetro de campo que se incrusto directamente al suelo fue de 6.4, la prueba de alófono indico baja presencia de aluminio activo, la temperatura del suelo promedio fue de 11.93 °C. La orientación del flujo del río es de oeste a este. La pendiente registrada sobre el río fue de 7.5 %, con un relieve de tipo cóncavo.



Figura 11. San Felipe Teotlalcingo. Río naciente del manantial y parcelas adyacentes al manantial y río



Figura 12. Izoalco. Cauce del río y vegetación predominante.

#### Ejido de Río Frío Caso: Intervalo altitudinal 3 (3000-3500 m)

Se encuentra ubicado en las coordenadas UTM 524499 m W y 2145104 m N, fue considerado un ambiente alto con 3166 m snm. La vegetación formada por estratos es arbóreo, arbustivo y herbáceo, sobresale el bosque de pino encino y otras especies de arbustos como *Senecio angulifolius* y *Baccharis* sp. La humedad ambiental del sitio fue de 60.5% y la temperatura de 10.2 y 12 ° C. Se observaron rocas

riolitas y suelo de tipo Andosol húmico en el ambiente extra ribereño, y Andosol vítrico y leptosol en la ribera, con profundidades de 10 a 70 cm y textura arenosa y areno-limosa en profundidades mayores el pH fue de 5.18. La pendiente del río es muy escarpada con un valor de 35%.



Figura 13. Cauce del río de Ejido Río Frío

#### Apatlaco Caso: Intervalo altitudinal 4 (3500-4000 m)

Se encuentra en las coordenadas UTM 540322 m W y 2111936 m N, con una altitud de 3626 m considerado por su tipología dentro de los sitios altos. Se identificó entre la vegetación principalmente a *Pinus hartwegii*, *Cirsium* sp. (Rosa de los volcanes) y gramíneas del género *Muhlenbergia*. La humedad registrada fue de 30.4 % con temperatura ambiental de 9.7 a 10 °C. Se observaron afloramientos de rocas ígneas andesitas dacitas y riolitas en el material geológico de los cuales se derivaron suelos de tipo Regosol y Andosol. Estos suelos tienen una profundidad que va desde 0.15 m hasta 1 m, con textura limo-arenosa. El pH en campo que se obtuvo fue de 4.7 mostró prueba positiva de aluminio activo. La pendiente registrada del río fue de 15 %, el relieve característico de este sitio es cóncavo.



Figura 14. Cauce del río y vegetación ribereña de Apatlaco.

### Propiedades físicas y químicas del suelo y capa de fermentación.

En los Cuadros 7a y 7b se presentan promedios, desviaciones estándar e intervalos de los valores de las propiedades físicas y químicas del suelo en cada condición de uso de suelo y el Cuadro 8 presenta el análisis de las correlaciones de Pearson entre los valores de las propiedades del suelo con los valores evaluados de las variables ambientales y topográficas (pendiente, temperatura, humedad, etc.).

Los diferentes valores de los cuadros (7a y 7b) se discuten con mayor amplitud en sus relaciones con la actividad enzimática arilsulfatasa y ureasa (páginas 44 y 55).

Cuadro 7 a. Propiedades físicas y químicas del suelo y capa de fermentación para cada uso de suelo.

Uso de suelo		Profsue	C Mant.	HumM	HumS	DA	pH-S	pH-CF	CE-S	CE-CF
		Cm	g m <sup>-2</sup>	%		g cm <sup>-3</sup>	1:2		dS m <sup>-1</sup> (1:5)	
Urbano, Agrícola y Pecuario	Promedio	39.8	876.7	27.5	15.6	1.1	5.5	5.7	0.5	0.8
	DES VEST	29.1	667.3	18.7	8.8	0.2	0.6	0.9	0.3	0.4
	Intervalo	6-100	212-1150	7-52	8-24	1-1.1	4.6-6.2	4.6-6.5	0.2-1.1	0.3-1.4
Acuícola y Forestal	Promedio	55.8	815.9	46.9	34.2	0.8	5.3	5.5	0.3	0.7
	DES VEST	29.7	692.6	26.6	10.9	0.2	0.4	0.3	0.2	0.2
	Intervalo	10-100	293-2019	8-72	26-42	0.6-1	4.5-5.8	4.9-6	0.03-0.7	0.5-1
Ecoturístico y Forestal	Promedio	76.8	774.1	42.7	27.7	0.8	5.0	5.3	0.3	0.5
	DES VEST	32	346.3	29.1	9.6	0.2	0.2	0.4	0.1	0.4
	Intervalo	45-107	631-952	10-76	24-25	0.7-0.9	4.7-5.2	4.7-5.7	0.2-0.4	0.4-0.7
Forestal	Promedio	62.3	351.80	14.8	23.2	0.9	4.5	4.1	0.2	0.8
	DES VEST	34.4	174.8	22.7	7.7	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2
	Intervalo	56-70	351.8	14.8	23.2	0.7-1.2	4.2-4.7	3.9-4.3	0.2-0.3	0.5-1

Profsue=profundidad del suelo, C Mant.= carbono del mantillo, HumM= humedad del mantillo, HumS= humedad del suelo, DA= densidad aparente, pH-S= pH del suelo, pH-CF= pH de capa de fermentación, CE-S= conductividad eléctrica del suelo, CE-CF= conductividad eléctrica de capa de fermentación.

Cuadro 7 b. Propiedades físicas y químicas del suelo.

Uso de suelo		MOS	MO-CF	COS	CO-CF	C:N-S	C:N-CF
		%		%			
Urbano, Agrícola y Pecuario	Promedio	3.4	10.8	1.8	2.6	14.2	6.9
	DES VEST	2.1	9.8	1.2	2.3	10.4	2.7
	Intervalo	0.8-6.2	4.3-29	0.4-3.4	1-7	3-35.0	5.1-8.9
Acuícola y Forestal	Promedio	8.6	15.9	4.7	3.8	31.7	11.4
	DES VEST	3.1	9.0	1.7	2.2	13.6	4.6
	Intervalo	5.4-15.4	6.3-34.7	2.9-8.3	1.5-8.3	13.5-50.8	5.4-16.2
Ecoturístico y Forestal	Promedio	7.8	15.9	4.2	4.0	15.0	12.2
	DES VEST	3.7	8.3	2.0	2.0	4.7	5.3
	Intervalo	3-13	4.4-25	1.7-7	1.1-6	12-18	6.8-17.2
Forestal	Promedio	5.7	20.6	3.1	5.0	14.1	13.5
	DES VEST	2.2	9.8	1.2	2.4	4.7	3.3
	Intervalo	4.3-8.3	7.8-27.9	2.3-4.5	1.9-6.7	10.7-16	9.4-16.4

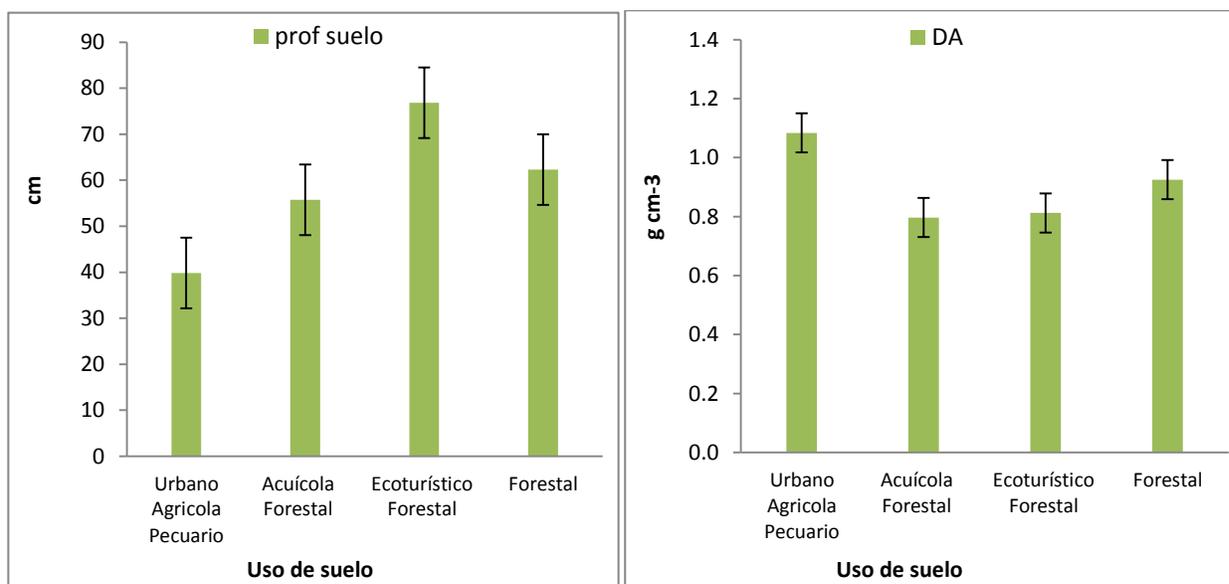
MOS= materia orgánica del suelo, MO-CF= materia orgánica de la capa de fermentación, COS= carbono orgánico del suelo, CO-CF= carbono orgánico de la capa de fermentación, C:N-S= relación carbono nitrógeno del suelo, C:N-CF= carbono orgánico de la capa de fermentación.

La profundidad de los suelos fue en promedio de 50 cm y no mayores a un metro, con una humedad de 25 %, los suelos menos profundos se encontraron en los sitios ribereños de menor altitud, observando que la falta de vegetación ribereña y el uso de suelo urbano y agrícola favorecen su pérdida por erosión, por lo que parte de los suelos más profundos se hallaron en la región con uso de suelo ecoturístico y forestal (3000-3500) como se muestra en la Figura 15 en la gráfica A , las formas y desarrollo de suelo por las diferentes formas del relieve y los efectos de la presencia de vegetación natural pueden ser factor de su retención y estabilidad en las orillas del cauce del río (Mander *et al.*, 2005).

Cuadro 8. Valores de coeficientes de correlación de Pearson e intervalos de confianza ( $p \leq 0.05$ ) para las propiedades físicas y químicas de suelo y capa de fermentación

	Profun. Suelo	% Hum Suelo	% Hum Mant	COS	CO-CF	pH-S	pH-CF	DA	CE-S	CE.CF	C/N-S	C/N-CF
Profun. Suelo	1.00											
% Hum Suelo	<b>0.285</b> <b>0.017</b> <b>69</b>	1.00										
% Hum Mantill	0.088 0.478 <b>66</b>	<b>0.312</b> <b>0.007</b> <b>71</b>	1.00									
COS	<b>0.328</b> <b>0.001</b> <b>87</b>	<b>0.588</b> <b>&lt;.0001</b> <b>93</b>	<b>0.405</b> <b>0.0002</b> <b>82</b>	1.00								
CO-CF	0.056 0.662 <b>62</b>	<b>0.255</b> <b>0.038</b> <b>66</b>	<b>0.488</b> <b>&lt;.0001</b> <b>68</b>	<b>0.294</b> <b>0.008</b> <b>80</b>	1.00							
pH-S	-0.086 0.410 <b>92</b>	0.003 0.972 <b>97</b>	-0.065 0.553 <b>84</b>	-0.144 0.116 <b>120</b>	<b>-0.246</b> <b>0.026</b> <b>81</b>	1.00						
pH-CF	-0.024 0.821 <b>86</b>	0.017 0.870 <b>93</b>	0.059 0.589 <b>84</b>	-0.115 0.222 <b>114</b>	<b>-0.545</b> <b>&lt;.0001</b> <b>81</b>	<b>0.771</b> <b>&lt;.001</b> <b>120</b>	1.00					
DA	-0.122 0.271 <b>82</b>	<b>-0.597</b> <b>&lt;.0001</b> <b>97</b>	-0.187 0.093 <b>81</b>	<b>-0.516</b> <b>&lt;.0001</b> <b>107</b>	<b>-0.229</b> <b>0.044</b> <b>77</b>	0.145 0.123 <b>113</b>	0.108 0.263 <b>109</b>	1.00				
CE-S	-0.128 0.225 <b>91</b>	<b>-0.325</b> <b>0.001</b> <b>97</b>	0.174 0.116 <b>82</b>	<b>-0.193</b> <b>0.034</b> <b>120</b>	0.017 0.877 <b>81</b>	0.113 0.211 <b>124</b>	<b>0.245</b> <b>0.007</b> <b>118</b>	0.155 0.102 <b>111</b>	1.00			
CE-CF	-0.181 0.107 <b>80</b>	0.159 0.137 <b>88</b>	-0.065 0.566 <b>79</b>	0.090 0.350 <b>108</b>	<b>0.455</b> <b>&lt;.0001</b> <b>81</b>	<b>0.200</b> <b>0.032</b> <b>114</b>	-0.116 0.215 <b>114</b>	0.069 0.482 <b>104</b>	<b>-0.19</b> <b>0.036</b> <b>112</b>	1.00		
C/N-S	0.014 0.894 <b>86</b>	<b>0.331</b> <b>0.001</b> <b>91</b>	<b>0.346</b> <b>0.001</b> <b>81</b>	<b>0.283</b> <b>0.001</b> <b>118</b>	0.088 0.437 <b>80</b>	0.128 0.166 <b>118</b>	<b>0.205</b> <b>0.029</b> <b>112</b>	<b>-0.19</b> <b>0.042</b> <b>105</b>	<b>-0.203</b> <b>0.026</b> <b>118</b>	0.179 0.065 <b>106</b>	1.00	
C/N-CF	0.063 0.624 <b>62</b>	<b>0.367</b> <b>0.002</b> <b>66</b>	<b>0.289</b> <b>0.016</b> <b>68</b>	0.069 0.538 <b>80</b>	<b>0.453</b> <b>&lt;.0001</b> <b>81</b>	<b>-0.36</b> <b>0.001</b> <b>81</b>	<b>-0.40</b> <b>0.0002</b> <b>81</b>	<b>-0.23</b> <b>0.040</b> <b>77</b>	<b>-0.240</b> <b>0.030</b> <b>81</b>	0.014 0.903 <b>76</b>	-0.021 0.851 <b>80</b>	1.00

Letras en negritas representan coeficientes de correlación significativos ( $p \leq 0.05$ )

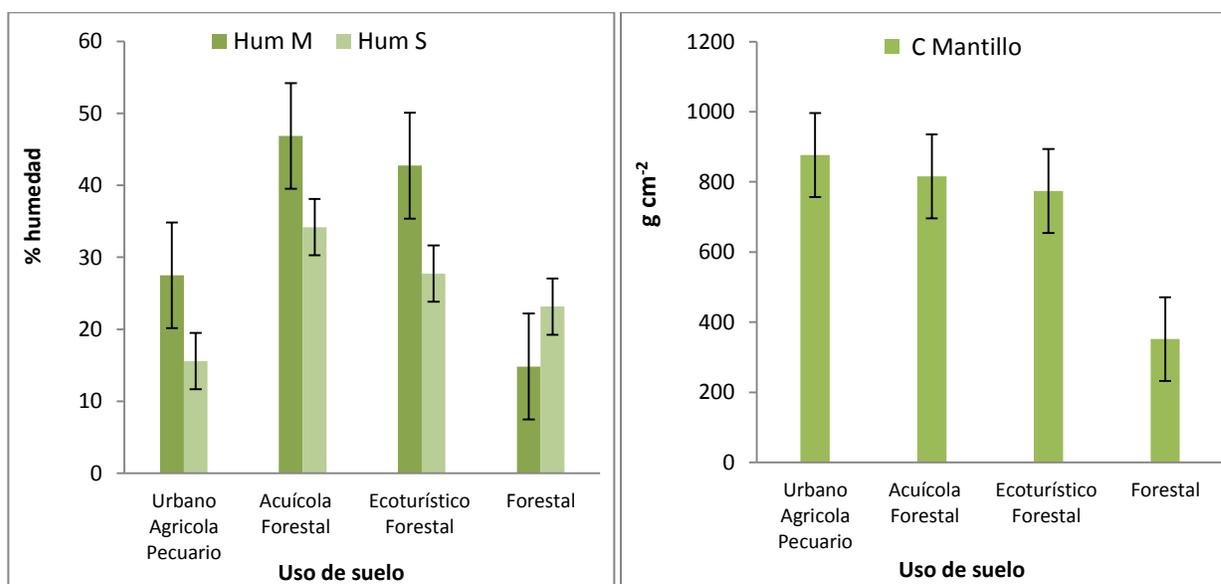


A)

B)

Figura 15. A) Profundidad del suelo en los diferentes usos de suelo del PNIP. B) Densidad aparente en los diferentes usos de suelo del PNIP

El suelo presentó valores de densidad aparente promedio menor a  $1 \text{ g cm}^{-3}$ . Según la NOM-021-SEMARNAT-2000, esta densidad es característica de suelos volcánicos (Giménez, 2009). Soji (1995) citado en Alcalá *et al.* (2001) indica que la densidad aparente en Andosoles generalmente son  $\leq 0.9 \text{ g cm}^{-3}$ , lo cual atribuye al desarrollo de microagregados estables con alta porosidad y al alto contenido de humus. También se presentaron valores altos en zonas bajas (Figura 15, grafica B) donde la densidad aparente oscila entre  $1.2$  y  $1.3 \text{ g cm}^{-3}$  porque son sitios con algún grado de compactación con uso de suelo urbano y agropecuario principalmente. La densidad aparente además de indicar el grado de compactación del suelo también muestra la relación del suelo con el agua, por lo que la densidad del suelo influye directamente en la cantidad de humedad del suelo, en la gráfica A de la Figura 16 se muestra que en suelos de uso agrícola y agropecuario se encontró el menor porcentaje de humedad en suelo siendo los sitios de mayor densidad aparente, aquellos donde la compactación impide que el agua se infiltre por lo que los sitios con mayor porcentaje de humedad son sitios con menor densidad encontrándose en sitios con áreas menos perturbadas y mayor cantidad de vegetación, lo cual también explica el alto contenido de humedad en mantillo como lo muestra en la Figura 16 en la gráfica B. Según el análisis de correlaciones estas dos variables tienen alta significancia estadística con una  $r=0.59$ ,  $p \leq 0.05$ .



A)

B)

Figura 16. A) Porcentaje de humedad de suelo y mantillo en los diferentes usos de suelo del PNIP. B) Carbono en mantillo en los diferentes usos de suelo del PNIP.

Como lo muestra la Figura 16 en la gráfica B, la cantidad de carbono en mantillo fue mayor en los sitios con menor altitud y en suelos con mayor impacto negativo del hombre y la presencia de especies vegetales de ciclo de vida largo lo que favorece el aporte constante de hojarasca que es depositada en el suelo cada vez en mayor cantidad mientras va aumentando la altitud, la presencia de estos organismos adquiere mayor incidencia de especies perenes como los pinos, hasta encontrar en el último intervalo altitudinal que las condiciones climáticas solo permiten el establecimiento de especies resistentes a bajas temperaturas como el zacatonal montano en donde la cantidad de mantillo que aporta al suelo es menor.

El pH de los suelos en general es moderadamente ácido, tanto en suelo como en capa de fermentación y según la NOM-021-SEMARNAT-2000, coincidentemente con los resultados de Martínez (2012) y Mascot (2013) que realizaron estudios en suelos de sistemas ribereños ubicados en la Cuenca de México. De acuerdo al gradiente altitudinal, los valores del pH fueron mayores en suelos que tienen algún grado de perturbación, localizados en sitios bajos, mientras que en suelos forestales conservados y de mayor altitud disminuyó el pH (Figura 17, gráfica A); cambiando de neutro a moderadamente ácido, mientras que en capa de fermentación llegó a ser fuertemente ácido. Resultados semejantes fueron reportados por Alcalá *et al.* (2001) quienes realizaron un estudio de suelos Andosoles en la Meseta Tarasca en

Michoacán y Pérez (2013) encontrando resultados semejantes al comparar Andosoles bajo uso agrícola y uso forestal.

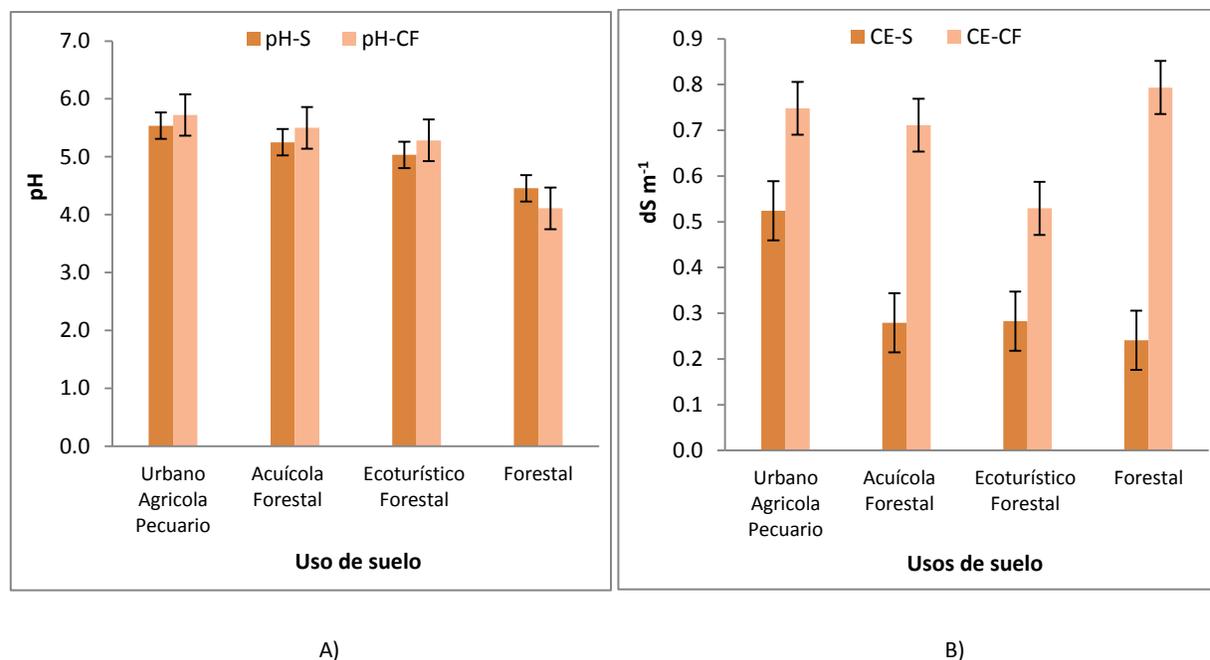


Figura 17. A) pH en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelo del PNIP. B) Conductividad eléctrica en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelo del PNIP.

Con respecto a la conductividad eléctrica de los suelos ribereños se observó una situación similar en los diferentes sitios dentro del uso del suelo y el intervalo altitudinal, y tanto en suelo como en capa de fermentación, los valores encontrados fueron de ligeramente salinos a valores que por muy bajos son despreciables según la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Tabla 7A). La grafica B de la Figura 17 muestra un alto contraste entre los valores de suelo y capa de fermentación siendo esta en donde se llevan a cabo procesos de descomposición donde son liberados más cationes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  ó  $\text{H}^+$ , existiendo más cantidad de sales en esta capa.

El porcentaje de materia orgánica (MO) promedio en suelo fue clasificado como medio, debido a que registraron valores muy bajos en sitios de menor altitud. Donde se observó una mayor densidad de vegetación la concentración de MO se clasificó como alta. El contenido de MO en capa de fermentación fue en general alta con intervalos de baja a muy alta según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

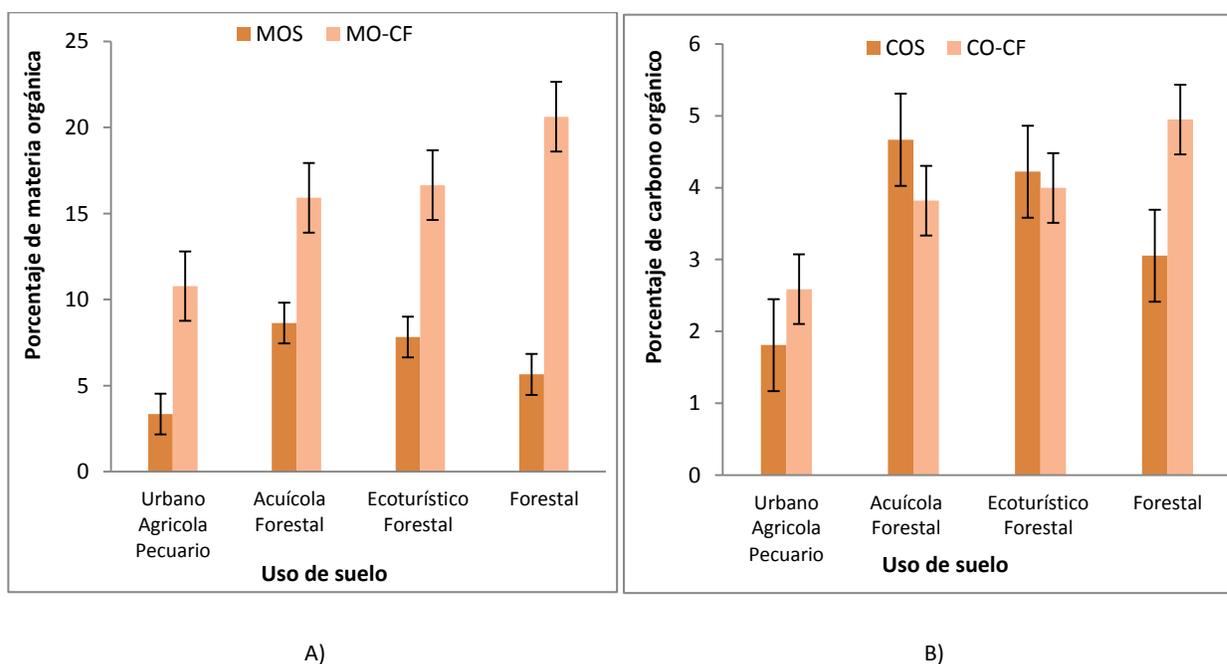


Figura 18. A) Contenidos de Materia orgánica en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelo del PNIP. B) Contenidos de Carbono orgánico en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelo del PNIP.

De lo anterior se desprende que en general el carbono orgánico en el suelo fue muy abundante en sitios mejor conservados y en aquellos donde se presenta vegetación de hoja caduca los cuales aportan mayor cantidad de material orgánico al suelo. Acorde con Cruz y Etchevers (2011) y Pérez (2013) quienes indicaron que existen diferencias en los aportes de COS por la vegetación presente, en esta investigación también se encontró que las concentraciones de COS bajo vegetación de Oyamel son mayores que las de suelos bajo vegetación de Pinos. Además encontraron que en ambientes no perturbados es mayor la concentración de COS. El COS es un importante elemento en la caracterización de los suelos, pues influye en la mayoría de las propiedades químicas, físicas y biológicas, las cuales están vinculados con la calidad, sustentabilidad y productividad (Martínez, 2006).

Respecto al carbón y su relación con el Nitrógeno los resultados mostraron la relación carbono nitrógeno en suelos ribereños y su capa de fermentación en general es buena obteniendo resultados de 14:1 a 31:1 en suelo, según Ladd *et al.* (2004, citado en Cruz y Etchevers, 2011) los suelos con relación C:N entre 15:1 y 30:1 tienen un tiempo de residencia medio, donde es favorecido el crecimiento y reproducción de los microorganismos, beneficiando la descomposición del material orgánico. Como se muestra en la gráfica de la Figura 19 en suelos de uso acuícola y forestal fue el segundo intervalo altitudinal donde se tiene la

mayor pero aun favorable relación de carbono nitrógeno debido al alto contenido de carbono en estos sitios.

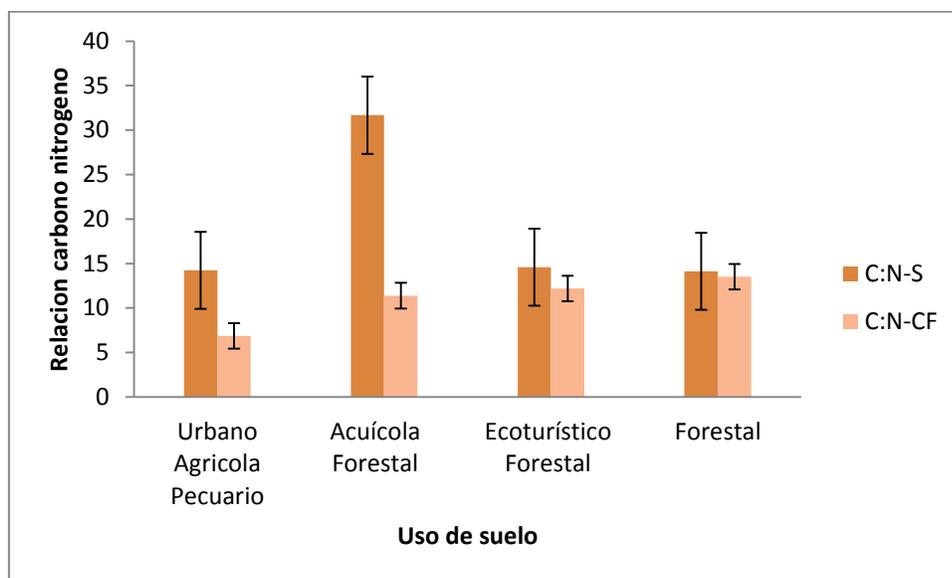


Figura 19. Relación carbono nitrógeno en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelos ribereños del PNIP.

### Sulfatos del suelo, capa de fermentación y actividad enzimática arilsulfatasa (AAS)

De acuerdo con la literatura consultada aún no se han establecido normas que comparen las concentraciones de sulfatos en suelos de México. Los resultados que se obtuvieron muestran que estas se encuentran en un intervalo de 39 a 132  $\text{mg k}^{-1}$  de  $\text{SO}_4^{-2}$  en capa de fermentación y en los suelos las concentraciones fueron de 27.4 a 139  $\text{mg k}^{-1}$ . En el Cuadro 9 se indican los promedios de sulfatos en suelo y capa de fermentación correspondientes a cada uso de suelo en los intervalos altitudinales de los sistemas ribereños. Las concentraciones encontradas fueron superiores al ser comparadas con otros estudios, realizados en la Cuenca de México del Parque Nacional Izta- Popo, los cuales se hicieron en fechas previas a las emisiones volcánicas del Popocatepetl en el año 2013, cuando fueron realizados los muestreos de esta investigación.

Los estudios referidos de estos muestreos fueron llevados a cabo del 2008 al 2012, con promedio de concentraciones de sulfatos de 0.1 a 0.25 ppm, Baltazar (2009) realizó un estudio de sulfatos y AAS en el municipio de Amecameca y San Pedro Nexapa a un intervalo altitudinal de 2600 y 3800 reportando concentraciones de sulfatos en suelos forestales de entre 0.13 y 0.2  $\text{mg kg}^{-1}$  de  $\text{SO}_4^{-2}$  con un promedio de

0.21 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que las concentraciones obtenidas por Martínez (2012), fueron de 0.18 a 0.25 mg kg<sup>-1</sup> de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> y las concentraciones obtenidas por Mascot (2013), fueron de 0.1 a 0.3 mg kg<sup>-1</sup> de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>.

Cuadro 9. Promedio, desviación estándar y valores (*mínimo – máximo*) de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en suelo y capa de fermentación, concentración de AAS en los diferentes usos de suelo.

Uso de suelo	Nº sitios	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> -S	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> -CF	AAS
		mg kg <sup>-1</sup>		µg pNP g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>
Urbano, Agrícola y Pecuario	6	27.4 ± 22.4 (11.7-69.9)	43.7 ± 38.4 (8.5-99.8)	0.03 ± 0.2 (0.02-0.03)
Acuícola, Forestal	7	71.3 ± 35.9 (12.5-94.3)	46.3 ± 23.2 (6.8-82.3)	0.03 ± 0.1 (0.02- 0.03)
Ecoturístico, Forestal	5	87.3 ± 85.5 (50.1-114.4)	68.9 ± 19.2 (45.9-87.5)	0.04 ± 0.1 (0.02-0.07)
Forestal	3	139.1 ± 102.5 (27.9-253.5)	131.9 ± 11.8 (112.4- 132.4)	0.06 ± 0.1 (0.02-0.12)

SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>-S= sulfatos en suelo, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>-CF= sulfatos de capa de fermentación, AAS= actividad arilsulfatasa.

Con referencia a las concentraciones de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> encontradas en esta investigación, las gráficas de la Figura 20 muestran el comportamiento de los SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en los diferentes usos de suelo, observando que las concentraciones de estos iones en capa de fermentación y suelo tienen una tendencia similar al incrementarse la altitud. Los sulfatos en suelo de sitios de uso de suelo urbano y agropecuario son las concentraciones menores y en suelos forestales son los de mayor concentración.

Cuadro 10. Análisis de varianza para sulfatos del suelo y capa de fermentación.

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr> F	R <sup>2</sup>	Coefficiente de Variación	Media
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> S	22	655960.9	29816.4	Infty	<.0001	1.00	-	80.1
Altitud	19	646046.2	34002.4	Infty	<.0001	-	-	-
Uso de suelo	3	234442.1	78147.4	Infty	<.0001	-	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> CF	19	183910.5	9679.5	Infty	<.0001	1.00	-	61.96
Altitud	16	181067.6	11316.7	infty	<.0001	-	-	-
Uso de suelo	3	118473.1	39491	Infty	<.0001	-	-	-
AAS	22	0.044584	0.0020	1.13	NS	0.33	127.2	0.03
Altitud	19	0.037222	0.0019	1.09	NS			
Uso de suelo	3	0.007356	0.0024	1.37	NS			

GL=grados de libertad; NS=no significativo.

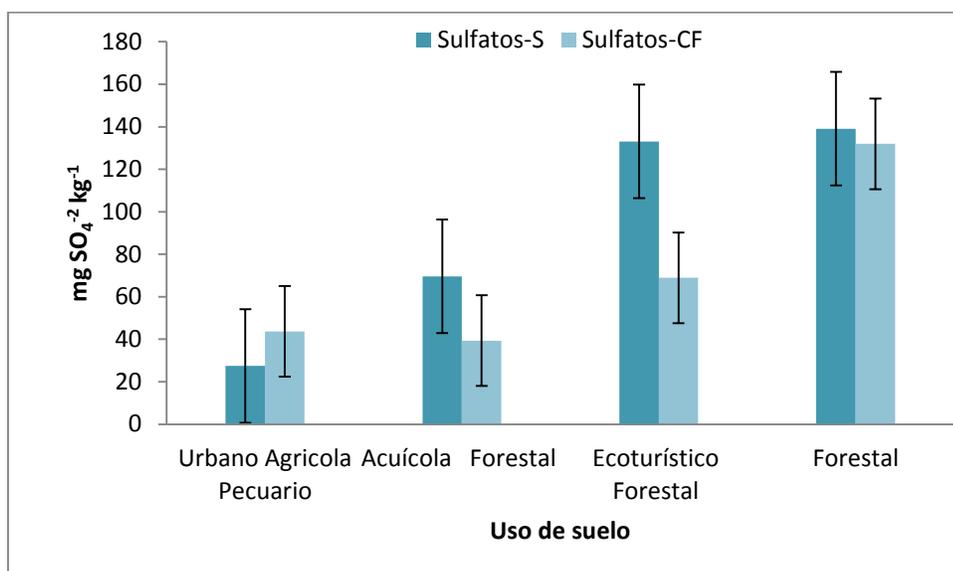


Figura 20. Concentraciones de sulfatos en los diferentes usos de suelos ribereños del PNIP

Los suelos de sitios más bajos presentaron los sulfatos en menor concentración en suelo y capa de fermentación, esto fue atribuido a la baja actividad microbiana y a la pérdida parcial de la vegetación en las riberas de los ríos donde el porcentaje de materia orgánica en suelo y capa de fermentación fue la de menor concentración pues al no contar con condiciones favorables de temperatura, humedad, aireación y pH que requieren los microorganismos para su desarrollo, el proceso de mineralización disminuye o es interrumpido y la reincorporación de la materia orgánica al suelo y la disponibilidad de este ion se ve limitada. Esto debe ser atribuido a las condiciones generadas por el cambio de uso de suelo principalmente pues son zonas dedicadas a la agricultura y se encuentran asentamientos humanos cercanos a los sistemas ribereños que ya han afectado a los suelos de estos ambientes en muchas de sus propiedades físicas y químicas.

Los sitios estudiados que se encuentran en el intervalo altitudinal de 2500 a 3000 msnm presenta uso de suelo dedicado a la producción de truchas en áreas forestales, en sitios mejor conservados donde existe un mayor aporte de material orgánico en suelo y capa de fermentación y como se observa en la gráfica de la Figura 21, al compararlos en su concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  con los sitios de menor altitud, y debido a que existen mejores condiciones de reciclamiento de los compuestos orgánicos se puede justificar el aumento del ion sulfato.

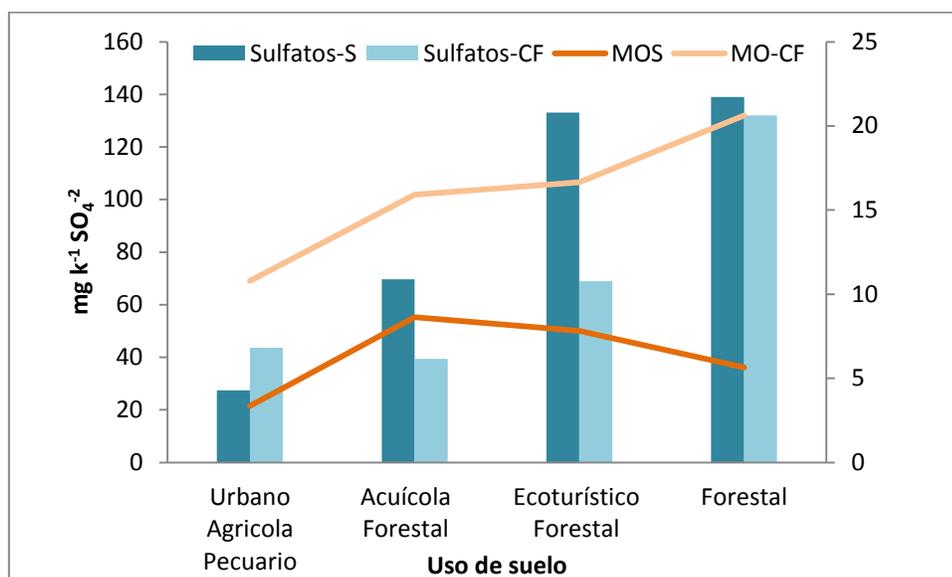


Figura 21. Concentración de sulfatos y su relación con los contenidos de Materia orgánica en suelo y capa de fermentación de sistemas ribereños del PNIP.

El aumento de concentraciones  $\text{SO}_4^{-2}$  en el tercer intervalo altitudinal (3000-3500) donde predomina su uso de suelo ecoturístico y forestal se debe a la mayor necesidad de éste elemento para mayor número especies vegetales, y microorganismos de la biota edáfica, y así la demanda de este elemento es mayor, observando que la mineralización es favorecida al encontrar que la concentración de MO también es mayor (Figura 21), por el aumento de diversidad de especies vegetales en estos sitios, las condiciones de temperatura y humedad son más favorables para la actividad biológica del suelo y por lo tanto para el reciclamiento de los desechos vegetales.

Las concentraciones más altas de iones  $\text{SO}_4^{-2}$  en suelos y capa de fermentación en sitios con uso de suelo forestal del más alto intervalo altitudinal son debidas a las deposiciones de ejetas volcánicas inmediatas del volcán Popocatepetl. Blasco (1970) menciona que donde existen residuos volcánicos recientes y materiales orgánicos frescos la mineralización del azufre suele verse favorecida.

Con datos tomados del CENAPRED se realizó un gráfico (Figura 22) de las emisiones de bióxido de azufre que ha arrojado el volcán Popocatepetl a lo largo de 7 años (2008-2014), y en él se muestra que en los años 2012 y 2013 el volcán tuvo mayores emisiones de este gas, el cual es el principal responsable de las deposiciones de azufre al suelo de forma natural.

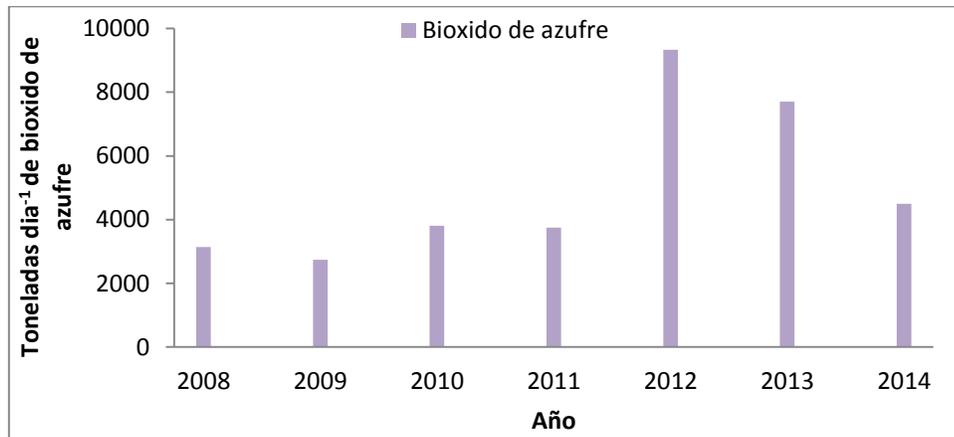


Figura 22. Emisiones de Bióxido de azufre del volcán Popocatépetl

En el Plan Operativo Popocatépetl 2013 del estado de México y el CENAPRED (2014), se menciona que los vientos sobre el volcán Popocatépetl generalmente soplan en dirección este-oeste, y la dirección dominante de los vientos de octubre a abril, es hacia el oriente mientras que de mayo a septiembre es hacia el poniente, coincidiendo con seis meses en los que se trabajó en campo realizando el muestreo, con influencia de compuestos volcánicos en la Cuenca del Alto Balsas.

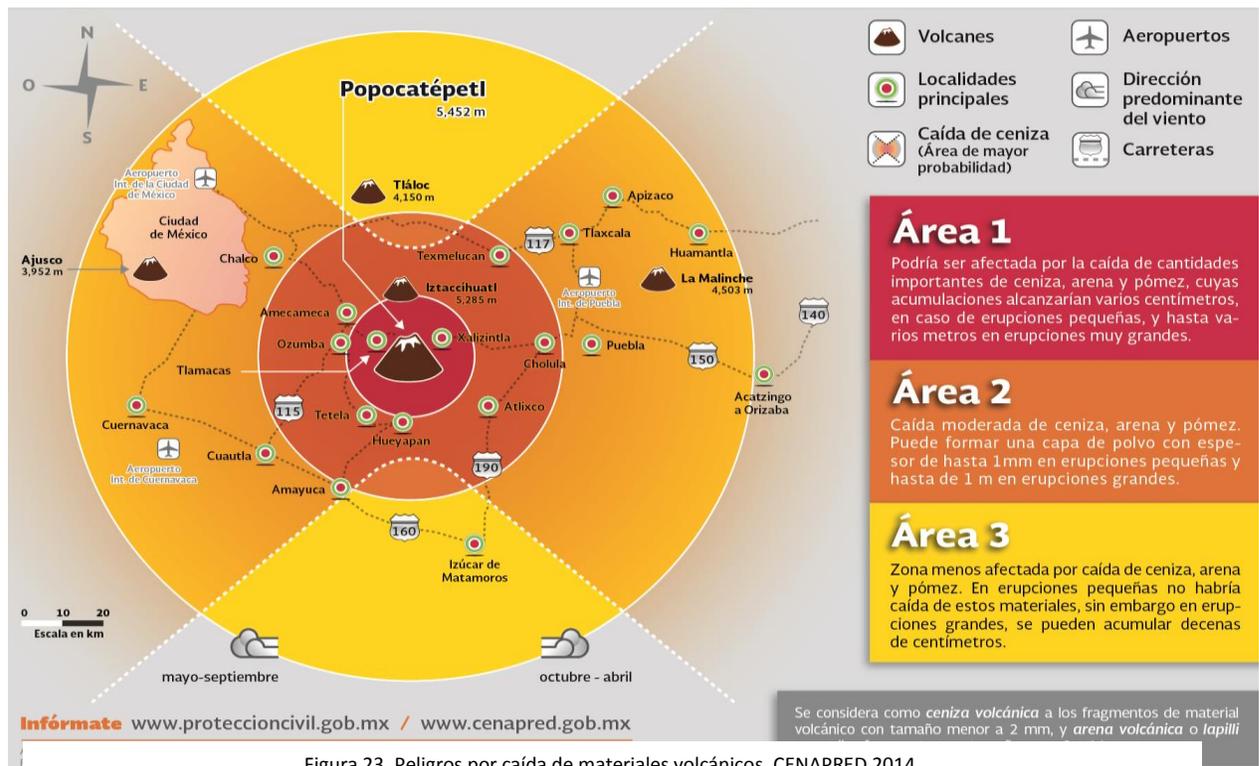


Figura 23. Peligros por caída de materiales volcánicos. CENAPRED 2014.  
<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/270-POPO-CENIZA.PDF>

El comportamiento de iones sulfatos con respecto a la concentración de MO se muestra en la gráfica de la Figura 21, el análisis estadístico (Cuadro 11) arrojó la evidencia de que los sulfatos del suelo tienen correlación significativa con la MO-CF ( $r=0.281$ ,  $p\leq 0.05$ ) y están altamente correlacionados con la MOS ( $r=0.579$ ,  $p\leq 0.05$ ). En el más alto intervalo altitudinal de sitios con uso de suelo forestal se encontró una alta concentración de MO en capa de fermentación debido a que existe una lenta mineralización de los compuestos orgánicos en los suelos de ribera en estos sistemas, donde se cambian algunas adversas condiciones como las bajas temperaturas y alta humedad del suelo que disminuyen la actividad de la biota edáfica.

Williams (1967) citado en Edwards (1998) indica que la actividad microbiana que promueve la mineralización de compuestos azufrados, no es propicia en regiones con bajas temperaturas aun teniendo disponibilidad de sustrato, sin embargo estas altas concentraciones de sulfatos pueden deberse a otros factores como el tipo de vegetación existente y uso de suelo, encontrándose principalmente zacatonal montano, Echeverria *et al.* (1996) mencionaron que en suelos bajo pastizales los niveles de sulfatos son superiores en comparación a los suelos de manejo agrícola (uso de suelo del primer intervalo altitudinal), pues en suelos bajo pastizales se mantiene un nivel de materia orgánica superior lo cual explica que la concentración de sulfatos fue mayor en suelos de sitios conservados de las mayores altitudes.

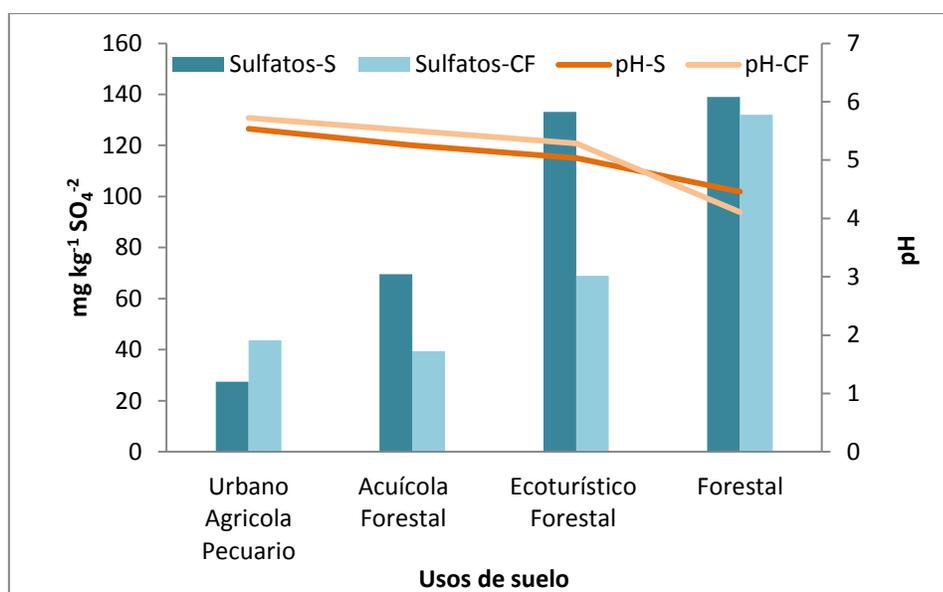


Figura 24. Concentración de sulfatos y su relación con el pH de suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelo en sistemas ribereños PNIP.

El análisis de los estudios de correlación mostró una correlación negativa, significativa, entre los iones  $\text{SO}_4^{-2}$  de CF y pH-S ( $r=-0.696$ ,  $p\leq 0.05$ ), dado que las transformaciones que en la capa de fermentación se efectúan, influyen directamente en las propiedades del suelo por el tipo de compuestos que son aportados y posteriormente descompuestos. La gráfica de la Figura 24 se observa el comportamiento de iones sulfatos y el pH. Como se ha mencionado el pH fue más bajo conforme la altitud se incrementa, al contrario de lo que ocurre en las concentraciones de  $\text{SO}_4^{-2}$ , un hallazgo semejante reporto Blasco (1970) quien indicó que en cuanto el pH-S se acidifica y los  $\text{SO}_4^{-2}$  tienden a incrementarse.

Cuadro 11. Valores de coeficientes de correlación de Pearson e intervalos de confianza ( $p\leq 0.05$ ) para DA, % de humedad del mantillo, pH del suelo y capa de fermentación, MO del suelo y capa de fermentación,  $\text{SO}_4^{-2}$  de suelo y capa de fermentación y arilsulfatasa.

	DA	% hum. mantillo	pH-S	pH-CF	MOS	MO-CF	$\text{SO}_4^{-2}$ -S	$\text{SO}_4^{-2}$ -CF	AAS
% hum mant	-0.187 0.093 81	1.00							
pH-S	0.145 0.123 113	-0.065 0.553 84	1.00						
pH-CF	0.108 0.263 109	0.059 0.589 84	<b>0.771</b> <b>&lt;.0001</b> <b>120</b>	1.00					
MOS	<b>-0.517</b> <b>&lt;.0001</b> <b>107</b>	<b>0.406</b> <b>0.0002</b> <b>82</b>	-0.141 0.123 120	-0.112 0.233 114	1.00				
MO-CF	<b>-0.229</b> <b>0.045</b> <b>77</b>	<b>0.487</b> <b>&lt;.0001</b> <b>68</b>	<b>-0.246</b> <b>0.026</b> <b>81</b>	<b>-0.546</b> <b>&lt;.0001</b> <b>81</b>	<b>0.292</b> <b>0.008</b> <b>80</b>	1.00			
$\text{SO}_4^{-2}$ -S	<b>-0.429</b> <b>&lt;.0001</b> <b>107</b>	0.208 0.067 78	<b>-0.333</b> <b>0.0002</b> <b>120</b>	<b>-0.421</b> <b>&lt;.0001</b> <b>114</b>	<b>0.579</b> <b>&lt;.0001</b> <b>116</b>	<b>0.281</b> <b>0.013</b> <b>77</b>	1.00		
$\text{SO}_4^{-2}$ -CF	0.027 0.796 92	<b>-0.280</b> <b>0.019</b> <b>69</b>	<b>-0.696</b> <b>&lt;.0001</b> <b>102</b>	<b>-0.815</b> <b>&lt;.0001</b> <b>102</b>	-0.104 0.312 96	0.166 0.74 68	<b>0.521</b> <b>&lt;.0001</b> <b>96</b>	1.00	
AAS	-0.018 0.878 68	<b>-0.269</b> <b>0.048</b> <b>54</b>	-0.083 0.480 73	-0.132 0.276 69	0.059 0.62 69	-0.19 0.889 53	0.157 0.203 67	0.068 0.598 62	1.00

Letras en negritas representan coeficientes de correlación significativos ( $p\leq 0.05$ )

En general las altas concentraciones de sulfatos que se encontraron, pueden deberse a los aportes de  $\text{SO}_4^{-2}$  de la actividad reciente del volcán Popocatepetl, que coinciden con la distribución de los materiales volcánicos y el comportamiento de sulfatos a través del gradiente altitudinal, pues se observa que las

concentraciones de  $\text{SO}_4^{-2}$  en suelos ribereños disminuyeron conforme los sitios se encuentren más alejados del cono volcánico. Se ha mencionado que la mineralización de los compuestos azufrados no siempre requiere de la actividad microbiana, debido a que muchas de las enzimas responsables de la despolimerización de moléculas grandes que contienen azufre se encuentran presentes extracelularmente en el suelo como la actividad de la enzima arilsulfatasa (McGill y Cole, 1981; Strickland *et al.*, 1984, citado en Edwards 1998).

Los valores de actividad enzimática de la Arilsulfatasa (AAS) estuvieron en un intervalo de 0.3 a 0.6  $\mu\text{g}$  de p-NP  $\text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$ . En la gráfica de la Figura 25 se observa el comportamiento de la AAS en los sitios con los diferentes usos de suelo a través del gradiente altitudinal, la tendencia de los valores fue similar a la concentración de sulfatos de suelo y capa de fermentación, por lo que existe correlación positiva entre las concentraciones de  $\text{SO}_4^{-2}$  en suelo y capa de fermentación con la AAS en los sitios ribereños de la región del Parque Nacional y en los sitios ribereños del área de influencia.

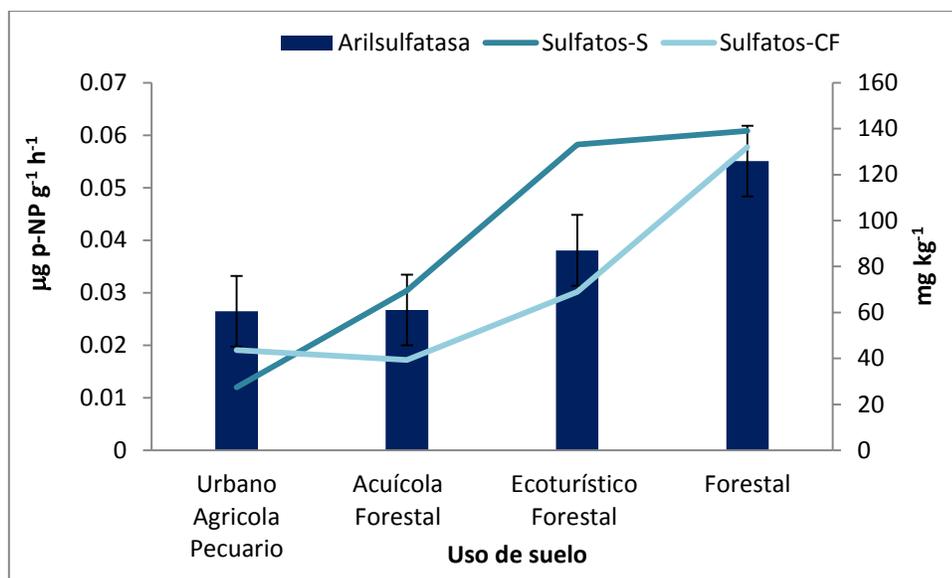


Figura 25. Valores de AAS y concentración de  $\text{SO}_4^{-2}$ -S y  $\text{SO}_4^{-2}$ -CF en los sitios ribereños de montaña del PNIP.

En el análisis de correlaciones de Pearson se encontró que la AAS tuvo correlación negativa con el porcentaje de humedad del mantillo ( $r=-0.26$ ,  $p\leq 0.05$ ) tal como se muestra en la gráfica de la Figura 26, esto puede deberse además de que es una enzima hidrolítica que requiere agua, al tipo de residuos vegetales aportados al suelo, porque donde se encontró mayor porcentaje de humedad de mantillo, en

son sitios dominados por vegetación de hoja caduca y vegetación herbácea, y por ser plantas de ciclo de vida corto la mineralización favorece la disponibilidad de compuestos sulfatados satisface la demanda para las plantas y los organismos del suelo que también presentan su rápida asimilación, y así la AAS es mínima.

Por otra parte en los sitios donde la humedad del mantillo es baja se encontró principalmente vegetación de coníferas, los restos vegetales son de difícil descomposición o como en el caso del pastizal montano, el mantillo fue escaso y aunado a las condiciones climáticas adversas que disminuyen la actividad de la fauna del suelo, la mineralización se ve afectada, por lo que la actividad enzimática se incrementa.

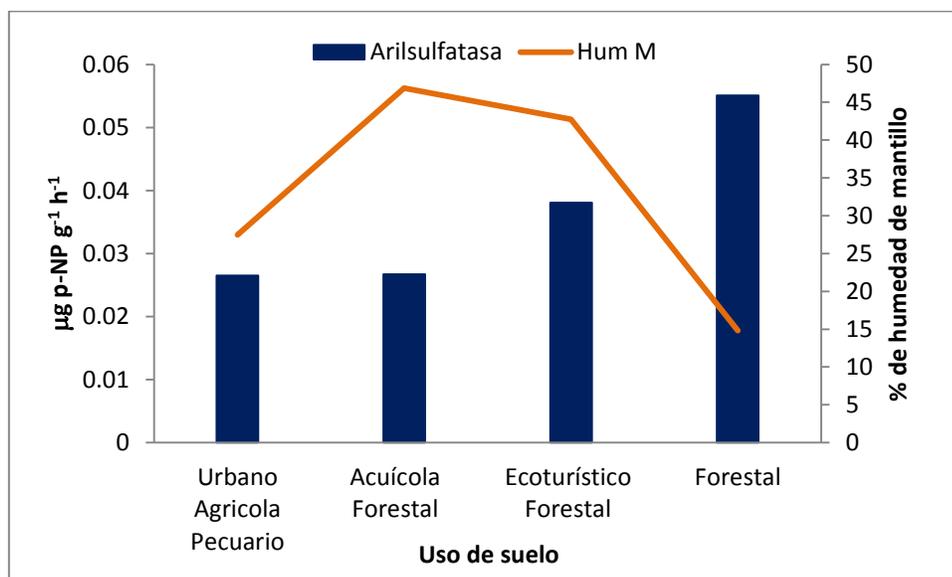


Figura 26. Valores de AAS y porcentaje de humedad de mantillo en sistemas ribereños del PNIP.

Algunos autores (Acosta-Martínez, 2007; Alvea *et al.*, 2007; Contreras *et al.*, 2005) han señalado que la actividad enzimática tiene una relación directa con la materia orgánica del suelo, es decir que a menor contenido de MOS mayor actividad de las enzimas del suelo. En el gráfico de la Figura 27, se observa la tendencia de los valores de la actividad arilsulfatasa con respecto a los contenidos de materia orgánica de suelo y capa de fermentación, observando un comportamiento similar entre la AAS respecto al porcentaje de materia orgánica en la capa de fermentación, que aumentan con los incrementos en la altitud de los sitios ribereños.

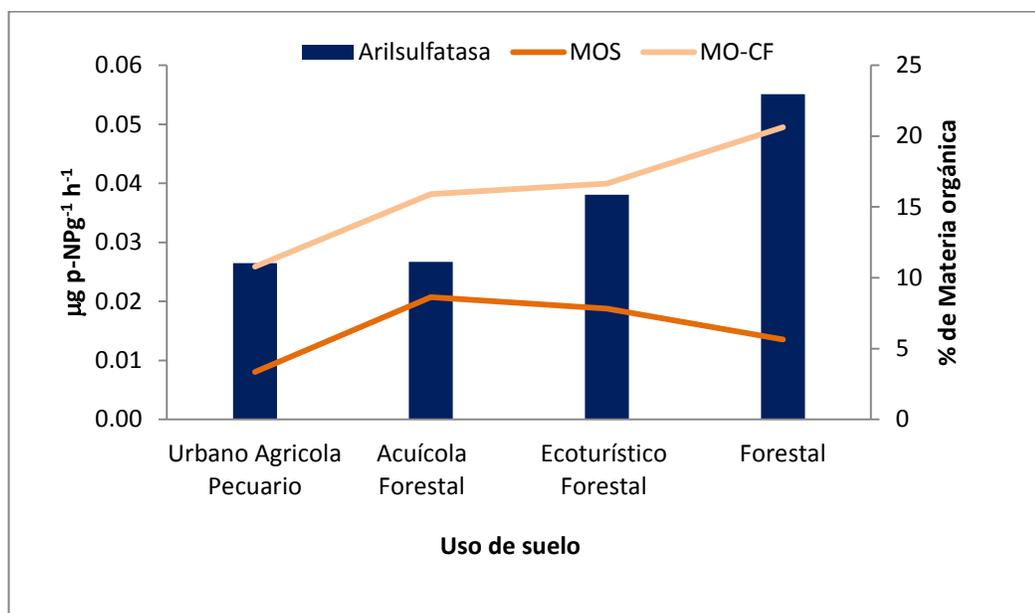


Figura 27. Valores de ASS y porcentaje de MOS y MO-CF en los diferentes usos del suelo en sistemas ribereños del PNIP.

También se observó un aumento de la actividad enzimática cuando el pH es más ácido en suelo y capa de fermentación (Figura 28), provocando así que los microorganismos encargados de la descomposición del material orgánico tenga bajos rendimientos por lo tanto baja disponibilidad de nutrientes, generando así la liberación de enzimas Arilsulfatasas.

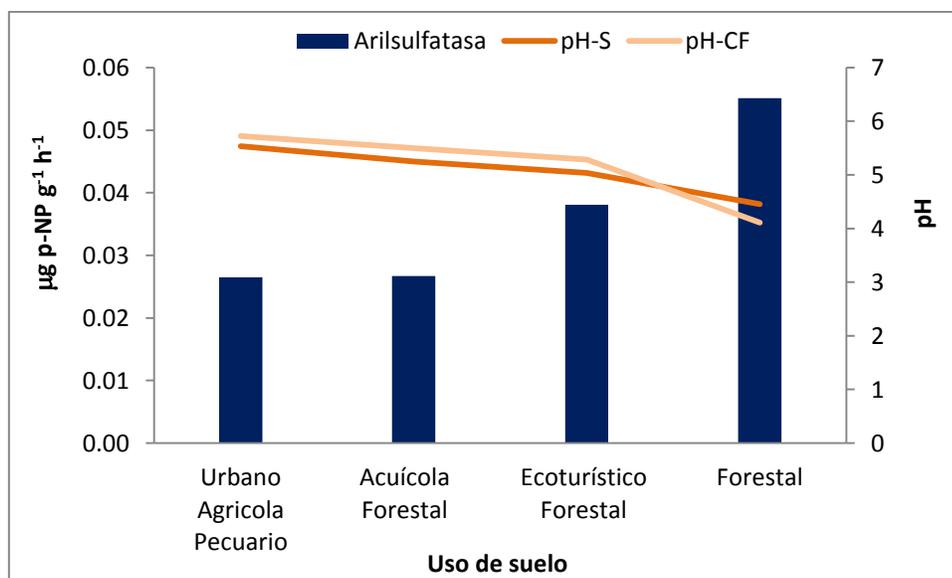


Figura 28. Valores de AAS y pH en suelo y capa de fermentación en diferentes usos de suelo en sistemas ribereños del PNIP.

La actividad Arilsulfatasa respecto a la densidad aparente del suelo aumenta en usos de suelo conservados, y en general existe un descenso en los valores de densidad aparente, la liberación enzimática de Arisulfatasa en suelos donde existe poca retención de agua y aire (suelos agropecuarios) es menos favorecida con densidades mayores a  $1 \text{ g cm}^{-3}$ , además de encontrar poco sustrato como la materia orgánica para la liberación del iones sulfatos. Al observar la gráfica de la Figura 29 se muestra que en suelos forestales hay un aumento en la densidad aparente siendo este valor no mayor a  $1 \text{ g cm}^{-3}$  siendo densidades aparentes características de suelos volcánicos.

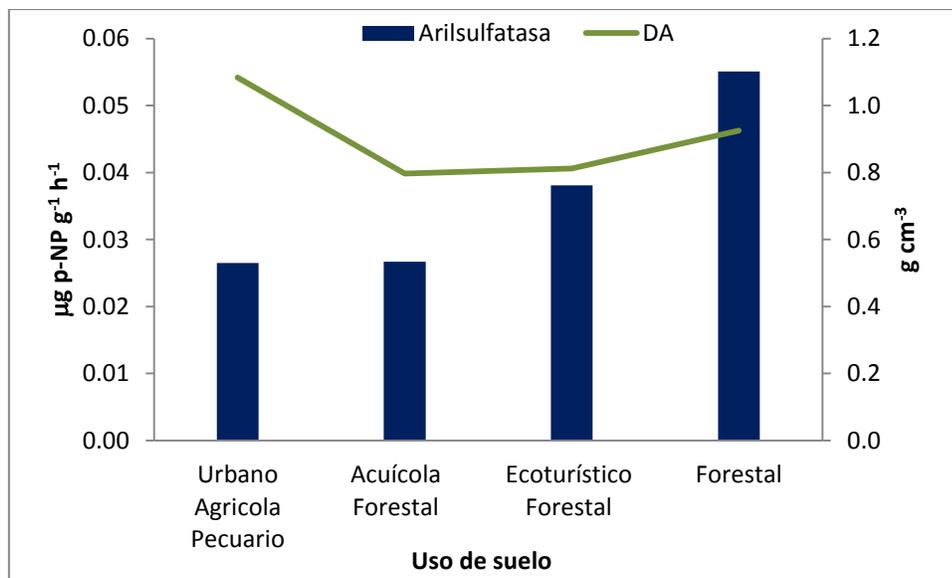


Figura 29. Valores de AAS y densidad aparente en los diferentes usos de suelo en sistemas ribereños del PNIP

### Concentración de N y actividad enzimática Ureasa (AU) en suelos ribereños.

Se presenta en el cuadro 12 el promedio de los contenidos de Nitrógeno total en suelo y capa de fermentación, la concentración de amonio soluble del suelo, y la actividad enzimática Ureasa en los diferentes usos de suelo.

Cuadro 12. Promedio, desviación estándar y valores (*mínimo – máximo*) de Nitrógeno total en suelo y capa de fermentación, amonio soluble y de AU en los cuatro diferentes usos de suelo en el PNIP y su zona de influencia.

Uso de suelo	Nº sitios	Nt-S	Nt-CF.	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> soluble	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> hidrolizado de AU
		%		meq NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup>	kg NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup>
Urbano Agrícola y Pecuario	6	0.2 ± 0.1	0.4 ± 0.2	2.0 ± 1.0	1491.4 ± 1231
		(0.03-0.3)	(0.1-0.7)	(2.0-4.0)	(111-2892)
Acuícola y Forestal	8	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.1	3.0 ± 1.0	776.5 ± 367
		(0.1-0.3)	(0.1-0.5)	(2.0-3.0)	(467-933)
Ecoturístico y Forestal	4	0.3 ± 0.2	0.3 ± 0.2	2.0 ± 1.0	1606.9 ± 761.4
		(0.2-0.3)	(0.2-0.3)	(1.0-3.0)	(995-1932)
Forestal	3	0.2 ± 0.01	0.4 ± 0.2	3.0 ± 1.0	514.6 ± 218.4
		(0.2-0.3)	(0.1-0.8)	(2.0-4.0)	(236-744)

Nt-S= nitrógeno total en suelo, Nt-CF= nitrógeno total en capa de fermentación, AU= actividad ureasa

El análisis de los suelos ribereños en los 21 sitios mostró concentraciones de amonio soluble entre 1.0 a 4.0 meq NH<sub>4</sub><sup>+</sup> kg<sup>-1</sup>. Respecto a las concentraciones de nitrógeno total encontradas, según la NOM-021-SEMARNAT-2000 fueron clasificadas como bajas en los suelos, mientras que en capa de fermentación los contenidos de nitrógeno total estuvieron entre las clases bajas y medias de acuerdo a la misma norma. Las mayores concentraciones de nitrógeno total en capa de fermentación con respecto a los suelos de 0 a 20 cm de profundidad (Figura 30) debe atribuirse al alto aporte de materia orgánica fresca que se deposita y donde se llevan a cabo procesos de descomposición y los compuestos nitrogenados aun no son mineralizados en su totalidad ni lixiviados, inmovilizados o volatilizados (Philippot, y Germon, 2005).

La importancia de la capa de fermentación sobre estos ecosistemas radica en que en ella se llevan a cabo procesos de descomposición donde elementos como el C, N, P y S son reciclados aceleradamente. Este proceso está condicionado por la cantidad y calidad de restos vegetales que son aportados por el dosel del bosque, en donde los nutrientes liberados del mantillo representan la principal fuente de suministro y de mantenimiento de la fertilidad del suelo (Barrales, 2013; Parzych y Trojanowski, 2006) citado en León *et al.* (2011).

En general el porcentaje de nitrógeno total en suelos ribereños aumentó conforme la altura de los sitios fue mayor (Figura 30), Suastegui (2009) encontró la misma tendencia en suelos forestales en la cuenca de México del Parque Nacional Izta-Popo. Sin embargo, la tendencia no es siempre a la alza porque se observó un descenso en los sitios de mayor altitud con uso de forestal, debido a una posible baja actividad microbiana y lenta mineralización de los compuestos orgánicos de estos sitios, justificado en el alto porcentaje de nitrógeno en capa de fermentación en donde fue acumulado.

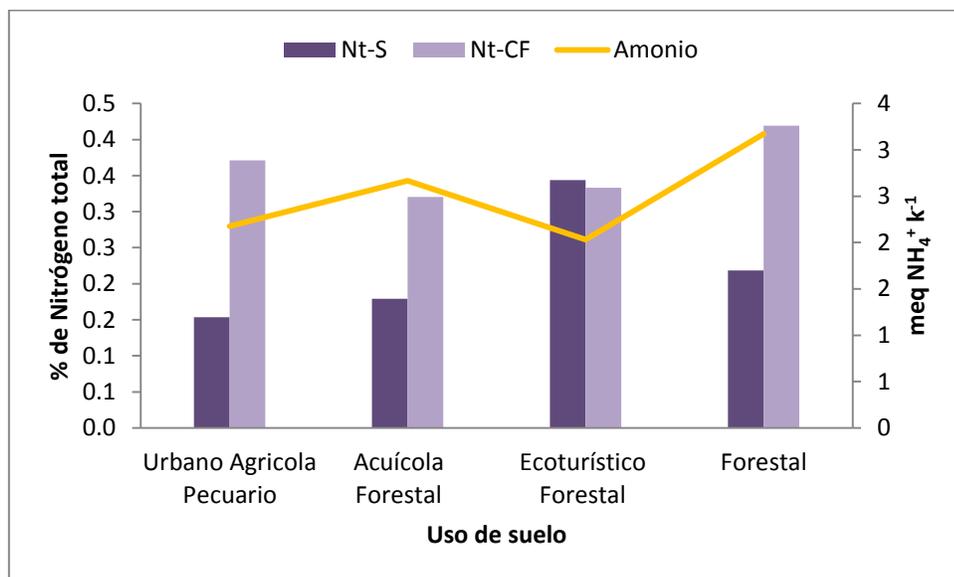


Figura 30. Porcentaje de Nitrógeno total en suelo y capa de fermentación y la actividad ureasa en los diferentes usos de suelo en sistemas ribereños del PNIP.

También se observó que existe una diferencia importante en los suelos de sitios con uso de suelo urbano y forestal en los sitios de menor altitud. En estos sitios el nitrógeno en suelo fue bajo, pero en capa de fermentación fue alto. Las razones que explican esto son similares a las descritas por los sitios de mayor altitud, pero ahora en estas sitios no se cuenta con condiciones favorables para que la descomposición microbiana se lleve correctamente, como consecuencia de alta actividad antrópica que altera los suelos como incrementar el valor de densidad aparente lo que implica una fuerte compactación en el suelo que interrumpe el proceso de mineralización por la baja aireación y poca humedad que son necesarias para que los microorganismos lleven a cabo eficazmente sus procesos metabólicos.

La alta concentración de nitrógeno es derivada principalmente de la actividad del hombre sobre estos sitios con presencia de campos agrícolas y zonas urbanas y donde existen aportes de desechos

domésticos orgánicos e inorgánicos en las riberas de los ríos, así como diversos compuestos inorgánicos de difícil descomposición y desechos dentro de los ríos que finalmente son arrastrados hasta quedar depositados en algún sitio de las cuencas (Camacho-Rico, 2006) por haber perdido la capacidad de almacenar y absorber elementos por la disminución de la cobertura de la vegetación impidiendo el reciclamiento de nutrientes (Granados, 2006).

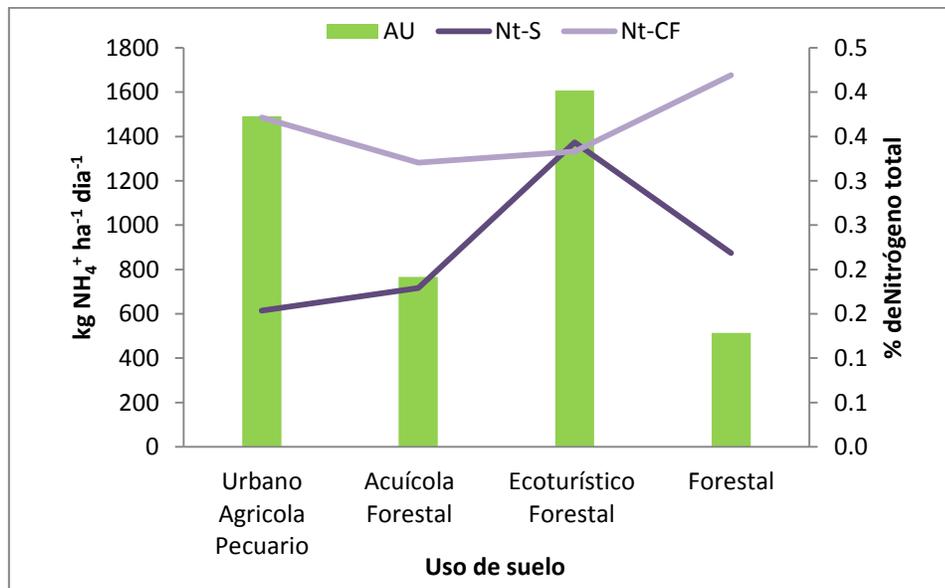


Figura 31. Actividad Ureasa y el porcentaje de Nitrógeno total en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelo en sistemas ribereños del PNIP.

Los valores de la actividad ureasa del suelo con respecto a los diferentes usos de suelo se muestra en la gráfica de la Figura 31 García (2008), señaló que la AU está altamente relacionada con la concentración de nitrógeno y materia orgánica (Figura 32), por otra parte Kang y Freeman, (1999) indicaron que ésta enzima actúa para compensar las necesidades de amonio y nitratos para las plantas y microorganismos, actuando directamente sobre la materia orgánica.

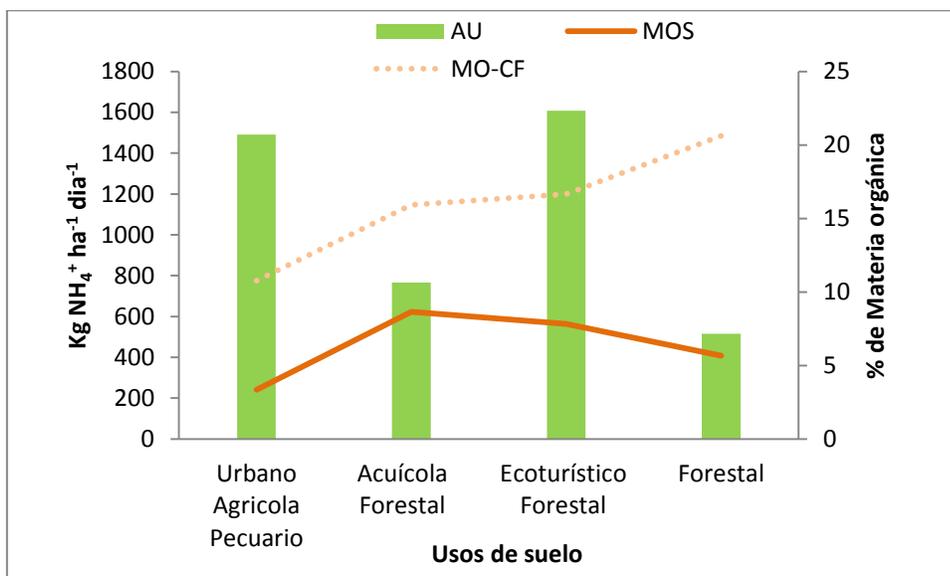


Figura 32. Actividad ureasa y el % de materia orgánica en suelo y capa de fermentación en los diferentes usos de suelo en sistemas ribereños del PNIP

En la gráfica de la Figura 31, se observa el comportamiento de amonio soluble y la actividad ureasa. El amonio soluble del suelo se encontró relacionado negativamente con la actividad ureasa ( $r=-0.22$ ,  $p \leq 0.05$ ), además se observó que existe una relación positiva entre nitrógeno total de suelo y la AU (Cuadro 14).

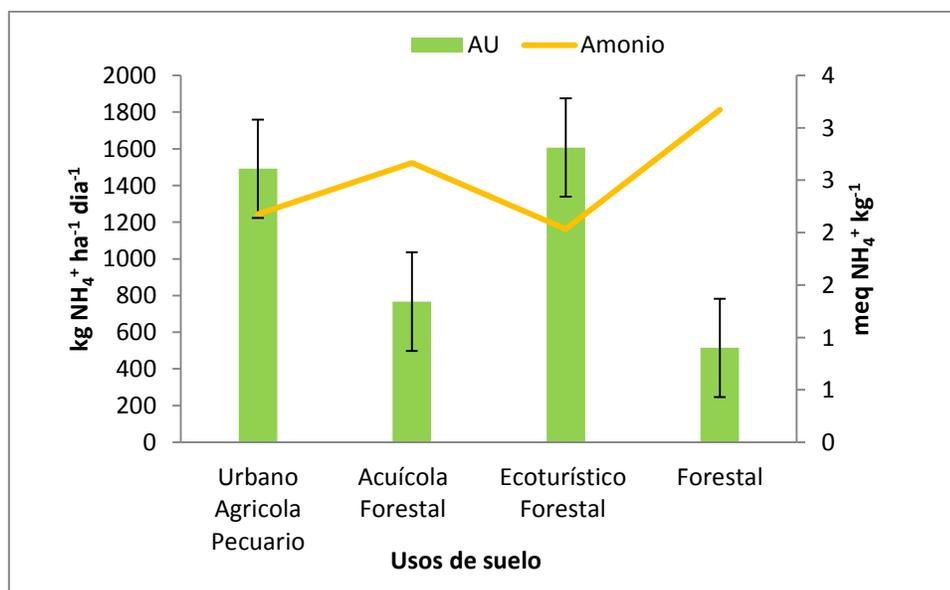


Figura 33. Valores de amonio soluble y AU en los diferentes usos de suelo en sistemas ribereños del PNIP.

La alta AU en los suelos ribereños del primer intervalo altitudinal se puede explicar porque el aumento de los aportes de urea en la adición de compuestos que se utilizan para la fertilización de los cultivos, y los aportes de excretas de ganado.

En los sitios con el uso de suelo forestal y acuícola existe mayor concentración de amonio y nitrógeno en capa de fermentación en los sitios donde se indicó la mayor concentración de materia orgánica, lo cual señala que fue favorecido el proceso de mineralización, con base en el descenso en la actividad ureasa que no fue requerida en los suelos ribereños de estos sitios. En el tercer intervalo altitudinal con uso de suelo forestal y ecoturístico, los valores de densidad aparente fue de las más bajas con  $0.8 \text{ g cm}^{-3}$ , este factor muestra que estos suelos cuentan con buena aireación y retención de humedad, y se encontró así un buen desarrollo de vegetal pues fue en donde se registró la mayor diversidad biológica. En los suelos de este intervalo altitudinal las concentraciones de nitrógeno en capa de fermentación y de amonio fueron las más bajas, pero el promedio de nitrógeno total en suelo fue el más alto, esto se debe a que existe una alta demanda de nitrógeno, de las formas asimilables para las plantas como son  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  que son absorbidas rápidamente, y como consecuencia puede influir la formación de otras formas químicas del nitrógeno en el suelo. Al existir estrés nutrimental por carencia de nitrógeno la AU fue activada para liberar  $\text{NH}_4^+$  y compensar la demanda de nitrógeno.

Cuadro 13. Análisis de varianza para nitrógeno del suelo y capa de fermentación.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr> F	R <sup>2</sup>	Coficiente de Variación	Media
$\text{NH}_4^+$	22	0.00008	0.000003	7.58	<.0001	0.67	29.79	0.002
Altitud	19	0.00008	0.000004	7.66	<.0001	-	-	-
Uso de suelo	3	0.00001	0.000004	7.21	0.0003	-	-	-
Nt-S	23	1.9	0.1	Infty	<.0001	1.00	0.0	0.2
Altitud	20	1.8	0.1	Infty	<.0001	-	-	-
Uso de suelo	3	0.5	0.2	Infty	<.0001	-	-	-
Nt-CF	22	4.6	0.2	316.8	<.0001	0.9	7.4	0.4
Altitud	19	4.4	0.2	349.9	<.0001	-	-	-
Uso de suelo	3	0.2	0.1	108	<.0001	-	-	-
Ureasa	22	70642164.2	3211007.5	46.4	<.0001	0.93	23.71	1109.6
Altitud	19	52454829.1	2760780.5	39.9	<.0001	-	-	-
Uso de suelo	3	18187335.1	6062445.1	87.6	<.0001	-	-	-

NS=no significativo

Con los resultados de esta investigación se plantea que para los sitios en el intervalo altitudinal de 3500-4000 m snm con uso de suelo forestal, el amonio liberado por esta enzimas fue el de menor aportación, aunque se propone que existen dos razones principales por la que la actividad ureasa disminuye: una, por las bajas temperaturas que impide la actividad microbiana y por lo tanto también la actividad enzimática como lo mencionó Yang (2006) citado por Medina (2012). Además de que también se encuentra la mayor concentración de Nt-CF, y la presencia de los suelos con más acidez (pH=4.46) condicionando los aportes de amonio por la enzima que tiene una actividad optima en un pH no acido (9.0) el cual se determina en laboratorio aunque en suelo el valor de pH puede ser menor.

Cuadro 14. Valores de coeficientes de correlación de Pearson e intervalos de confianza ( $p \leq 0.05$ ) entre densidad aparente, pH, materia orgánica, amonio, nitrógeno total y actividad ureasa del suelo con pH, materia orgánica, nitrógeno total en capa de fermentación.

	DA	PH-S	PH-CF	MOS	MO-CF	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Nt-S	Nt-CF	AU
DA	1.00								
pH-S	0.145 <i>0.123</i> 113	1.00							
pH-CF	0.108 <i>0.263</i> 109	<b>0.771</b> <i>&lt;.0001</i> <b>120</b>	1.00						
MOS	<b>-0.517</b> <i>&lt;.0001</i> <b>107</b>	-0.141 <i>0.123</i> 120	-0.112 <i>0.233</i> 114	1.00					
MO-CF	<b>-0.229</b> <i>0.045</i> <b>77</b>	<b>-0.246</b> <i>0.026</i> <b>81</b>	<b>-0.546</b> <i>&lt;.0001</i> <b>81</b>	<b>0.292</b> <i>0.008</i> <b>80</b>	1.00				
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-0.019 <i>0.855</i> 91	-0.093 <i>0.347</i> 102	-0.079 <i>0.43</i> 96	0.037 <i>0.71</i> 98	0.165 <i>0.154</i> 75	1.00			
Nt-S	<b>-0.217</b> <i>0.023</i> <b>109</b>	<b>-0.283</b> <i>0.001</i> <b>122</b>	<b>-0.275</b> <i>0.003</i> <b>116</b>	<b>0.538</b> <i>&lt;.0001</i> <b>118</b>	0.181 <i>0.104</i> 81	-0.086 <i>0.395</i> 98	1.00		
Nt-CF	0.042 <i>0.661</i> 109	-0.115 <i>0.207</i> 120	<b>-0.403</b> <i>&lt;.0001</i> <b>120</b>	0.181 <i>0.053</i> 114	<b>0.769</b> <i>&lt;.0001</i> <b>81</b>	0.0487 <i>0.637</i> 96	<b>0.215</b> <i>0.020</i> <b>116</b>	1.00	
AU	-0.125 <i>0.240</i> 89	-0.177 <i>0.077</i> 100	<b>-0.261</b> <i>0.011</i> <b>94</b>	0.054 <i>0.593</i> 98	0.042 <i>0.720</i> 75	<b>-0.220</b> <i>0.027</i> <b>100</b>	<b>0.350</b> <i>0.0004</i> <b>98</b>	0.087 <i>0.400</i> 94	1.00

Letras en negritas representan coeficientes de correlación significativos ( $p \leq 0.05$ )

## CONCLUSIONES

Considerando los resultados de esta investigación, puede afirmarse que el objetivo general fue alcanzado al demostrar que para la fertilidad de los suelos ribereños es muy importante la AAS porque libera un promedio cercano a  $0.6 \text{ kg de SO}_4^{-2} \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$  con un intervalo observado entre  $0.38$  y  $2.28 \text{ kg de SO}_4^{-2} \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$  y también porque la AU en promedio libera  $1087 \text{ kg NH}_4^+ \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$  con un intervalo que va de  $110$  a  $2892 \text{ kg NH}_4^+ \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ .

Los resultados mostraron que las variaciones en cantidades de  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{NH}_4^+$  liberados, responden al tipo de uso de suelo y a la altitud encontrando para la liberación de  $\text{SO}_4^{-2}$  mayor concentración en sitios ubicados entre  $3500$ - $4000 \text{ m}$  respecto al intervalo más bajo ( $2000$ - $2500 \text{ m}$ ), mientras que en la liberación de  $\text{NH}_4^+$  no hay diferencia entre sitios con distinta altitud aunque se encontraron dos picos de mayor actividad en suelos de zonas de uso urbano y agropecuario y de uso de suelo forestal ecoturístico.

En suelos de sistemas ribereños las actividades enzimáticas de la arilsulfatasa y de la ureasa se relacionan negativamente con los contenidos MO-CF (fracción lábil) que cuando disminuye por efectos altitudinales, inducen aumento de la AAS y AU incrementando la liberación de  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{NH}_4^+$ .

La concentración de los iones sulfato extractados en  $\text{HCl } 0.025 \text{ N}$  –  $\text{NaF } 0.03 \text{ N}$  y el amonio disponible (soluble en  $\text{H}_2\text{O}$ ) condicionan la actividad enzimática arilsulfatasa y ureasa en los suelos de los sistemas ribereños.

Con los resultados que derivan las observaciones realizadas en este trabajo, se tienen argumentos para aceptar la hipótesis planteada, dado que las actividades enzimáticas son afectadas por los diferentes usos de suelo que se tienen a través del gradiente altitudinal dentro del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia, que a su vez afectan las propiedades físicas y químicas del suelo como la temperatura, humedad, pH, contenidos de MO, liberación de iones sulfatos y amonio entre otras.

## Bibliografía

Acosta-Martínez V., Tabatabai M. A. (2000) Enzyme activities in a limed agricultural soil. *Biol Fertil Soils* 31: 85–91

Acosta-Martínez V., Zobeck T., Gill T., Kennedy A., 2003. Enzyme activities and microbial community structure in semiarid agricultural soil. *Biol Fertl Soil* 38: 216-227

Acosta-Martínez V., Acosta-Mercado D., Sotomayor-Ramírez D., Cruz-Rodríguez L., 2008. Microbial communities and enzymatic activities under different management in semiarid soil. *Applied soil ecology* 38: 249-260

Acosta, Y., Paolini, J., 2005. Actividad enzimática deshidrogenasa en un suelo calciorthids enmendados con residuos orgánicos. *Agronomía Trop.* 55(2): 218.

Alcalá M., Ortiz C., Gutiérrez M., 2001. Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacan. *Terra Vol* 19 (3): 227-239.

Alexander, M. 1980. *Introducción a la microbiología del suelo*. AGT Editor S.A., 491 p., México.

Almeda L., 1994. El zacatonal alpino del Volcán Popocatépetl, México y su posición en las montañas tropicales de América. *Phytocoenologia* 22(3): 391-436

Alvear M., Urrua C., Huaiquilao R., Astorga M., Reyes F. 2007. Actividades Biológicas de agregados en un suelo del bosque templado chileno bajo dos etapas sucesionales y cambios estacionales. *R. C. Suelo Nutr. Veg.* 7 (3).

Baltazar A. M., 2009. Actividad arilsulfatasa y azufre en suelo y tejido foliar en cuatro especies de coníferas en bosque templado. FES Zaragoza, UNAM. México D. F.

Bandick A. K., Dick, R., P., 1999. Field management affects on soil enzyme activities. *Soil Biol. Biochem.* 31: 1471-1479.

Barrales E., 2013. Balance de carbono y tasa de descomposición de mantillo y horizontes de fermentación de suelos forestales. Colegio de Postgraduados, Texcoco, México.

Blasco M. 1970, Curso de microbiología de suelos, Instituto Interamericano de ciencias agrícolas, Turrialba Costa Rica, pag. 178-104.

Blasco M., 1972. Contenido y metabolismo del azufre en suelos volcánicos de centro América. Panel sobre suelos volcánicos de America. pag 107-115

Brady, Nyle C. 1974, *The nature properties of soil*, 8th ed.(Chapter 3, Some important physical properties of mineral soil, pp 40-70; Chapter 11, Origin, nature, and classification of parent materials, pp 277-302; Chapter 12, Soil formation, classification, and survey, pp. 303-352) The Macmillan Co., New York 639 pp.

Brussa, C.A. & Grela, I.A. 2007. *Flora arbórea del Uruguay. Con énfasis en las especies de Rivera y Tacuarembó*. Cofusa Montevideo

Burns, R.G. 1982. Enzyme activity in soil: Location and a possible role in microbial ecology. *Soil Biology and Biochemistry*. 14: 423-427

Camacho F., Rico I., Bonfil C., 2006. Estructura y composición de la vegetación ribereña de la barranca del río Tembembe, Morelos, México. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 78: 17-31.

Carrete, R. (2010). *Monte indígena: mucho más que un conjunto de árboles*. Nordan-Comunidad. Montevideo.

Carrere, R. (2010).- *Monte indígena: mucho más que un conjunto de árboles*. Reedición Montevideo: Nordan, Guayubira, Ciedur, EGP.

Ceccon, E., 2003, *Bosques ribereños y a restauración y conservación de las cuencas hidrográficas*”, 72: 46-53

CONANP, 2014, en [www.http://conanp.gob.mx/infbasica.php](http://conanp.gob.mx/infbasica.php). Consultado en Febrero 2014

Contreras F., Paolini J., Rivero C., Efecto de la adición de enmiendas orgánicas sobre la actividad de las enzimas de la fosfomonoesterasa ácida y arilsulfatasa en suelo del municipio Rivas Dávila (estado Mérida). *Rev Fac. Agron. (Matacay)* 31: 53

Cruz, G., 2006, *Ecología del suelo. Un enfoque hacia la nutrición mineral de las plantas superiores*, UNAM, México. Pag. 24.

Cruz-Flores G., Etchevers-Barra J., 2011. Contenido de carbono orgánico del suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencia* 45:849-862.

Cruz-Flores G., y E. A. Guerra-Hernández. 2014. *GUÍA PRÁCTICA PARA LA DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DE LOS AMBIENTES RIBEREÑOS*. Material didáctico. Línea de investigación. Carrera de Biología. FES Zaragoza, UNAM.

- Deenik J., 2006, Nitrogen Mineralization Potential in Important Agriculture Soils of Hawai`i. *Soil and Crop Management* 15: 1-5
- Dick R., 1992, A review: long term effects of agricultural system on soil biochemical and microbial parameters. *Agriculture, ecosystems and environment* 40: 25-36
- Duchaufour P., Souchier B., 1984. Edafología. Edafogénesis y su clasificación (Carballas F. T., Carballas F. M., Masson. S. A. Barcelona España.
- Echeverría H., San Martín, N., Bergonzi R., 1996, Mineralización del azufre y su relación con la de nitrógeno en suelos agrícolas. *Ciencia del suelo, Argentina* 14:107-109
- Edwards P., 1998. Sulfur cycling, retention, and mobility in soil: A review. GEN. Tech. Rep NE-250. Radnor, PA: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. 18 p.
- Eriksen J., 1996. Incorporation of S into soil organic matter in the field as determined by the natural abundance of stable S isotopes. *Biol Fertil Soils* 22: 149–155
- Espinoza, J., Revah, S., Le S., 2010, “Rutas metabólicas de oxidación del azufre en bacterias quimiolitotrofas, relevancia ambiental y biotecnología”. *Mensaje Bioquímicos*, Vol. XXXIV, México, D.F.
- Freney, J R., 1961. Some observations on the nature of organic sulphur compounds in soil. *Australian Journal of Agriculture Research* 12: 424-432.
- García A., Rivero C., 2008. Efecto de la aplicación de lodo papelerero sobre la actividad enzimática de dos suelos de la Cuenca del Lago de Valencia, Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (Maracay)* 34: 151-166.
- Germida JJ, Wainwright M, Gupta VVSR 1993, Biochemistry of sulfur cycling in soil. In: Stotzky G, Bollag J-M (eds), *Soil Biochemistry* 7. Marcel Dekker, New York, pp 1–53.
- Ghani A, McLaren RG, Swift RS, 1993. Mobilization of recently formed soil organic sulphur. *Soil Biol Biochem* 25: 1739–1744.
- Gianfreda L, Bollag J-M. 1996. Influence of natural and anthropogenic factors on enzyme activity in soil. In: Stotzky G, Bollag J-M (eds) *Soil biochemistry*, vol 9. Marcel Dekker, New York, pp 123–194.
- Gianfreda, L., Rao M., 2011, *The Influence of Pesticides on Soil Enzymes*, Shukla G., Varma A., (eds). 2011, *Soil Enzymology, Soil Biology*, Berlin.
- Gimenez J., Escamilla M., Almeida L., 2009. Datos sobre la vegetación higrófila altimontana del Volcan Iztaccíhuatl (México), *LAZAROA* 30: 109-118.

- Granados D., Hernández M., López G., 2006. Ecología de las zonas ribereñas. *Revista Chapingo Ciencias Forestales y del Ambiente* 12 (1): 55-69.
- Hancklaus S., Bloem E., Schnug E., Sulfur interaction in crop ecosystems. Hawkesfor M., De Kok L. (eds), 2007. *Sulfur in Plants an Ecological Perspective*, Springer. The Netherlands.
- Hernández, A.J.C., Gutiérrez, G.G., Almeida, L.L. y Ordóñez, D.J.A.B. 2005. Análisis dendroclimático de *Pinus hartwegii* en el volcán nevado de Toluca. México. I Simposio Ecología, manejo y conservación de los ecosistemas de montaña en México. Memorias. Laboratorio de Biotecnología y Ecología Aplicada. LABIOTECA. Xalapa, Veracruz, México. Noviembre 17 y 18, 2005.
- Herrera, R. (1985). Nutrient cycling in Amazonian forests. En: Prance G. & Lovejoy T. (Eds.). *Amazonia, Key Environments*. Oxford.
- Jaramillo, D.J. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín Johnson BL, Richardson WB, Naimo TJ. 1995. Past, present, and future concepts in large river ecology. *BioScience* 45: 134–141.
- Kang H, Freeman C. 1999. Phosphatase and arylsulphatase activities in wetland soils: annual variation and controlling factors. *Soil Biol Biochem* 31:449–454
- Klose S., Tabatabai M., (2000). Urease activity of microbial biomass in soils as affected by cropping systems. *Biol. Fertil. Soil* 31: 191-199.
- León J., González M., Gallardo J., 2011. Ciclos biogeoquímicos en bosques naturales y plantaciones de coníferas en ecosistemas de alta montaña de Colombia. *Rev. Biol. Trop.* Vol 59 (4):1883-1894.
- Likens G., Driscoll C., Buso D., Mitchell M., Loveit M., Bailey S., Siccama T., Reiners W., Alewell C., 2002. The biogeochemistry of sulfur at Hubbard Brook. *Biogeochemistry* 60: 253-316.
- Lillo, A., Ramírez, H., Reyes, F., Ojeda, N., Alvear, M., 2011. Actividad biológica del suelo de bosque templado en un transecto altitudinal Parque Nacional Conguillío (38°S), Chile. *Bosque*, 32(1):47
- Makoi J, P Ndakidemi. 2008. Selected soil enzymes: Examples of their potential roles in the ecosystem. *African Journal of Biotechnology* 7(3): 181-191
- Mander Ü., Kuusemets V., Hayakawa Y., 2005. Purification processes, ecological functions, planning and design of riparian buffer zones in agricultural watersheds. *Ecological Engineering* 24, 421-432

- Mark B. David & Myron J. Mitchell (1987) Transformations of Organic and Inorganic Sulfur: Importance to Sulfate Flux in an Adirondack Forest Soil, JAPCA, 37:1, 39-44, DOI: 10.1080/08940630.1987.10466198
- Marschner, H., 1995, Mineral Nutrition of Higher Plantas. 2° edición, Academic Press,
- Martínez S., 2012. Actividad enzimática de suelos ribereños y su fertilidad en bosques del Parque Nacional Izta-Popo. FES Zaragoza, UNAM, México D. F.
- Mascot E., 2013. Azufre en el sistema agua-sedimento-suelo para ambientes ribereños asociados a diferentes condiciones de suelo. FES Zaragoza, UNAM, México D. F.
- McGill WB, Cole CV., 1981. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. Geoderma 26: 267–28
- Medina M., 2012. Caracterización bioquímica y microbiológica de un suelo de pradera de *Dactylis glomerata* y *Medicago sativa* bajo diferentes proporciones de siembra. Ediciones Universidad Salamanca. Salamanca España.
- Meza E., Geissert D., 2003. Estructura y porosidad en suelos forestales y cultivados de origen volcánico del Cofre de Perote, Veracruz México. Foresta Veracruzana Vol 5(2): 57-60
- Miller, E.K., Johnson, A.H., Vann, D.R., Joshi, A.B., 2003. Nitrogen availability and forest productivity along a climosequency on Whiteface Mountain, New York. Canadian Journal of Forest Research 33, 1880-1891
- Montagnini F, Jordan CF (2002) Reciclaje de nutrientes. En: Guariguata MR, Kattan GH (eds) Ecología y conservación de bosques neotropicales. Libro Universitario Regional. Cartago. 691 pp.
- Nannipieri P., Kandeler E., Ruggiero P., 2002, Enzyme Activities and Microbiological and Biochemical Process in Soil. In Burns R., Dick R., (Eds). Enzymes in the environment. Activity Ecology and Applications, Marcel Dekker, New York
- NORMA Oficial Mexicana NOM-21-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelo. Estudios, muestreo y análisis
- Paz J., 2006, "Propiedades Bioquímicas de Suelo de Prado de Galicia". Universidad de Compostela Facultad de Farmacia, pag. 48-50, 53-56.
- Philippot, L. and J. C. Germon. 2005. Contribution of bacteria to initial input and cycling of nitrogen in soils. pp. 159-176. In: F. Buscot and A. Varma (eds.). Microorganisms in soils: roles in genesis and functions. Soil Biology. Springer-Verlag. Heidelberg, Germany.

Pocknee, S., Sumner, M. E. (1997): Cation and nitrogen contents of organic matter determine its soil liming potential. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 86–92.

Pritchett W., 1990. Suelos forestales. Editorial Limusa, México, D.F.

Pritchett W., 1991. Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Editorial Limusa, México, D.F.

Pérez-Ramírez, S., Jaramillo-López M., Bautista F., 2013. Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: Reserva de la Biosfera mariposa monarca, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1): 157-173.

Rengel, Z. 2002. Role of pH in availability of ions in soil. In *Handbook of Plant Growth*. (Ed) É Rengel Z. pag. 323-349. Marcel Dekker Inc. New York.

Rüdiger H., Cordula K., Sulfur in biotic Interactions of Plantas, Hawkesfor M., De Kok L. (eds), 2007. *Sulfur in Plants an Ecological Perspective*, Springer. The Netherlands.

Rzedowski, G. C. de, J. Rzedowski y colaboradores, 2005. *Flora fanerogámica del Valle de México*. 2a. ed., 1a reimp., Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro (Michoacán), 1406 pp

Salisbury F., Ross C., 2000, *Fisiología de las plantas 1. Células: agua, soluciones y superficies*, Paraninfo Thomson Learning, Madrid España, pag. 176

Schnug E, Haneklaus S (1998) Diagnosis of sulphur nutrition. In: Schnug E (ed.), *Sulphur in Agroecosystems*. Part of the series *Nutrients in Ecosystems*, Vol. 2. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, pp 1–38

Serrada R. 2008. *Apuntes de Selvicultura*. Servicio de Publicaciones. EUIT Forestal. Madrid.

Spurr S., 1982. *Ecología Forestal*, Agt Editors. México, D.F.

Stanier R., Ingraham J., Wheelis M., Painter P. 1992. *Microbiología*. Segunda edición. Editorial Reverte, S.A. Barcelona, España.

Strickland T., Fitzgerald J., 1983. Mobilization of recently formed forest soil organic sulfur. *Can. J. For. Res.* 14: 63-67

- Suastegui E., 2009. Contribución de la actividad de la ureasa a la liberación de nitrógeno en suelo de uso Agrícola y forestal. FES Zaragoza, UNAM, México D. F.
- Sundarapandian SM, Swamy PS (1999) Litter production and leaf-litter decomposition of selected tree species in tropical forests at Koday ar in the Western Ghats, India. *Forestry Ecology and Management* 123: 231-244
- Tabatabai M. A. 1994, Soil Enzymes. In:Weaver R. W., A. Scott, P. Bottomley, D. Bezdicek, S. Smith, A. Tabatabai, Wollum (Eds). *Methods of Soil Analysis*. N° 5, Soil Science Society of America, Inc. Madison USA
- Thompson, L., Troeh F., 1982, "Los suelos y su fertilidad", Editorial Reverté, cuarta edición, España, pag. 54, 91, 93, 159, 218
- Tisdale S., Nelson W., 1991, *Fertilidad de los suelos*, Editorial Limusa, México D.F.
- Trasar-Cepeda C., Leiros, F., Gi Sotres, 1998. Towards a biochemical quality index for soil: an expression relating several biological and biochemical properties. *Biol Fertil Soil* 26: 100-106
- Tyler G. 1981. Heavy metals in soil biology and biochemistry. *Soil Biochemistry* 5. 371-413
- Urbano, P., 1992, "Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell", Ediciones Mundi-prensa, Madrid España, pag. 88, 95.
- WHITTAKER, R. H. 1970. *Communities and ecosystems*. Editorial MacMillan, New York. 385 p.
- WRB. 2007. *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Primera actualización 2007. *Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103*. FAO, Roma
- Yang Z, Liu S, Zheng D, Feng S (2006) Effects of cadmium, zinc and lead on soil enzyme activities. *J Environ Sci* 18:1135–1141

## Anexo A

### Determinación de sulfatos

- ◆ Solución extractante HCL 0.025 N – NH<sub>4</sub>F 0.03 N.

Disolver 1.11 g de NH<sub>4</sub> en 900 mL de agua destilada y agregar 2 mL de HCL concentrado. Aforar a 1 litro en un matraz aforado.

- ◆ Método turbidimétrico del sulfato de bario

#### Reactivos

- Ácido clorhídrico (HCL) 6 N.
- Cloruro de Bario (BaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O).
- Sulfato de potasio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
- Ácido acético.
- Goma de acacia. Disolver 0.5 g de goma en polvo en 100 mL de ácido glacial 1:1. Conservar la solución en refrigeración.

#### Procedimiento

Se pesa 1 g de suelo y se coloca en un tubo de 50 mL, se le adiciona 15 mL de la solución extractante, se cubren los tubos con plástico y se tapan. Se agitan por 5 minutos en un agitador de acción reciproca a 180 opm. El extracto se filtra y simultáneamente se corren blancos de reactivos.

Se colocan 5 mL del extracto del suelo en un tubo Erlenmeyer; agregar 0.5 mL de la solución de la goma de acacia y 1 mL de HCL 6 N, agitar el contenido y agregar 0.25 g de cristales de BaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, se deja reposar 1 minuto, se agita el contenido del tubo hasta que se disuelvan los cristales y se lee la transmitancia a 420 nm.

#### Curva patrón

Disolver 0.54 g de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en agua o en solución extractora y aforar a un litro, que como resultado la solución contiene 100 ppm de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>. Se preparan concentraciones de 0, 4, 8, 12, 16 y 20 ppm de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, llevando a cabo las disoluciones correspondientes se toman 5 mL de cada una de las concentraciones en tubos y se agrega 0.5 mL de goma de acacia y 1 mL de HCL 6 N y proceder como en los problemas; leer la transmitancia a 420 nm.

**Determinación de la actividad Arilsulfatasa (Tabatabai y Bremer, 1970).**

## Reactivos

- Tolueno.
- Buffer Acetato 0.5 M, pH 5.8.

Disolver 68 g de acetato de sodio trihidratado en 700 mL de agua, adicionar 1.70 mL de ácido acético glacial (99%), y diluir a un litro en un matraz aforado.

- Solución de p-Nitrofenil sulfato, 0.05 M.

Disolver 0.614 g de potasio p-nitrofenil sulfato en 40 mL de Buffer Acetato, y diluir la solución a 50 mL con Buffer. Mantener la solución en refrigeración.

- Cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ , 0.5 M).

Disolver 73.5 g de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en 700 mL de agua y aforar a 1 L.

- Hidroxido de sodio (NaOH), 0.5 M.

Disolver 20 g de NaOH en 700 mL de agua y aforar a 1 L.

## Procedimiento

Pesar 1 g de suelo y colocarlo en un tubo, se adicionan 0.25 mL de tolueno, 4 mL de Buffer acetato y 1 mL de la solución de p-nitrofenil sulfato, se agita por varios segundos y se incuba a 37 °C por 1 hora. Se adiciona 1 mL de  $\text{CaCl}_2$  0.5 M y 4 mL NaOH, se agita por varios segundos y se filtra la suspensión de suelo con papel Whatman No. 2v, se midió la intensidad de color a 420 nm en un espectrofotómetro.

Calcular la concentración de p-nitrofenol contenido en los filtrados por referencia la gráfica de calibración que contiene patrones de 0, 10, 20, 30, 40 y 50  $\mu\text{g}$  de p-nitrofenol. Para preparar esta recta de calibración se diluye 1 mL de solución estándar de p-nitrofenol en 100 mL en un matraz aforado. Se pipetea 0, 1, 2, 3, 4 y 5 mL de esta solución y se ajustan el volumen a 5 mL añadiendo agua destilada, se añade 1 mL de  $\text{CaCl}_2$  0.5 M y 4 mL NaOH, se agita y se mide la intensidad de color a 420 nm en un espectrofotómetro. Si la muestra excede la absorbancia del patrón de 50  $\mu\text{g}$  se diluye con agua destilada hasta alcanzar valores de absorbancia dentro de la recta de calibrado.

**Determinación de nitrógeno total en suelo (Bremer 1965).**

## Reactivos

- Mezcla de ácido sulfúrico con ácido salicílico

Disolver 25 g de ácido salicílico ( $C_7H_6O_3$ ) en 1 L de  $H_2SO_4$  concentrado.

- Mezcla de indicadores

Disolver 0.099 g de verde de bromocresol y 0.066 g de rojo de metilo en 100 mL de alcohol etílico a 95% (preparar en el momento de usar).

- Ácido bórico con indicador.

Se colocan 20 g de  $H_3BO_3$  en un vaso de Precipitado de 1 L, se adicionan 900 mL de agua libre de  $CO_2$ , se calienta y se agita hasta la completa disolución del ácido. Se enfría la mezcla y se agregan 20 mL de la mezcla de indicadores. El pH de la solución debe ser aproximadamente 5.0 si fuese más ácido se agregan cuidadosamente gotas de NaOH 0.1 N hasta que la solución adquiera una coloración púrpura rojiza o se alcance el pH indicado. Se completa a un litro y se mezcla (si la coloración de la solución en verde antes de pH 5.0 hay que preparar nuevamente la solución).

- Mezcla de catalizadores

Se muele en un mortero y se mezcla 250 g de  $K_2SO_4$ , 25 g de  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  Y 2.5 g de selenio metálico. La mezcla se muele hasta alcanzar textura de polvo impalpable y se homogeniza perfectamente para evitar segregación de las partículas de los componentes.

- Hidróxido de sodio 10 N.

Se colocan 400 g de NaOH en un matraz aforado de 1L se adicionan 400 mL de agua se agita hasta que el hidróxido se disuelva y se deja enfriar. Se completa al volumen indicado y se agita vigorosamente. El hidróxido de sodio libre de  $CO_2$  debe protegerse del  $CO_2$  atmosférico, para lo cual debe mantenerse perfectamente tapado.

- Ácido sulfúrico 0.05 N.

Se diluyen 1.4 mL de  $H_2SO_4$  en agua y se enrasa a 1 L. Se estandariza con  $Na_2CO_3$  seco.

## Procedimiento

## ◆ Digestión

Se pesa 0.1 g de muestra y se colocan en un matraz microkjeldahl o en tubos. Se adicionan 4 mL de la mezcla de ácido sulfúrico-salicílico, cuidando que ésta se ponga en íntimo contacto con la muestra. Simultáneamente se corren blancos de reactivos. Se deja reposar toda la noche o al menos 6 horas.

### ◆ Destilación.

Se trasfiere el contenido al bulbo del aparato de destilación, se lava el tubo con pequeñas porciones de agua para obtener aproximadamente 7 mL. Se coloca en el tubo de salida del aparato de digestión del matraz Erlenmeyer de 125 mL con 10 mL de la solución de  $H_3BO_3$  con indicador. Se destilan aproximadamente 50 mL y se lava el condensador.

El nitrógeno amoniacal se determina por titulación con ácido 0.05 N. El punto de equivalencia de la titulación ocurre cuando la solución vira de verde a rosado (titular blancos y tomar como referencia este vire).

$$N \text{ (cmol kg}^{-1}\text{)} = (V_{\text{muestra}} - V_{\text{blanco}}) (N_{\text{acido}} \times 14) / \text{peso muestra} \times 10$$

Donde

$V_{\text{muestra}}$  = volumen de  $H_2SO_4$  para titular la muestra (mL)

$V_{\text{blanco}}$  = volumen de  $H_2SO_4$  para titular el blanco (mL)

N = normalidad exacta de  $H_2SO_4$

14 = peso mili-equivalente de N (mg)

1/10 = factor para convertir a porcentaje (100/1000)

### Determinación de Ureasa (Tabatabai y Bremer, 1972)

Reactivos

- Tolueno
- Buffer THAM (0.05 M, pH 9.0) y mezcla de KCl- $Ag_2SO_4$

Disolver 12.2 g de Tris aminometano (THAM) en 700 ml de agua, valorar el pH de la solución a 9.0 con  $H_2SO_4$  0.2 M y diluir a 1 L.

- Solución de cloruro de potasio (2.5 M)- sulfato de plata (100 ppm) (KCl- $Ag_2SO_4$ ).

Disolver 100 mg de  $Ag_2SO_4$  en 700 mL de agua, disolver 188 g de KCL en la solución, diluir la solución en 1 L de agua.

- Solución de urea, 0.2 M.

Disolver 1.2 g de urea in 80 mL de buffer THAM, y diluir la solución a 100 mL con buffer THAM. Mantener la solución en refrigeración.

- Oxido de Magnesio (MgO)
- Ácido Bórico

### Procedimiento

Pesar 2.5 g de suelo en tubos de ensaye de 70 mL. Correr para cada suelo, una muestra blanco bajo el mismo procedimiento, sustituyendo con agua, el volumen de solución de urea). Adicionar 0.1 mL de tolueno y 4.5 mL de Buffer THAM, agitar por varios minutos el contenido y adicionar 0.5 mL de Urea 0.2 M, agitar por varios minutos.

Colocar los tubos a incubar a 37 °C por 2 horas, pasado el tiempo adicionar 15 mL de KCl-Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y se agita por varios minutos, dejar enfriar y aforar a 25 mL de volumen con esta solución. Mezclar nuevamente.

Para la determinación de amonio (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) por arrastre de vapor.

Para determinar N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en la solución resultante:

Adicionar 0.1 g de MgO en el bulbo de destilación. Tomar 10 mL de la suspensión y agregarla al bulbo de destilación. Recibir el destilado en 10 mL de ácido bórico (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) con mezcla de indicadores. Destilar aproximadamente 4 minutos o hasta un volumen de 50 mL. Titular con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.0025 N.

**ANEXO B**

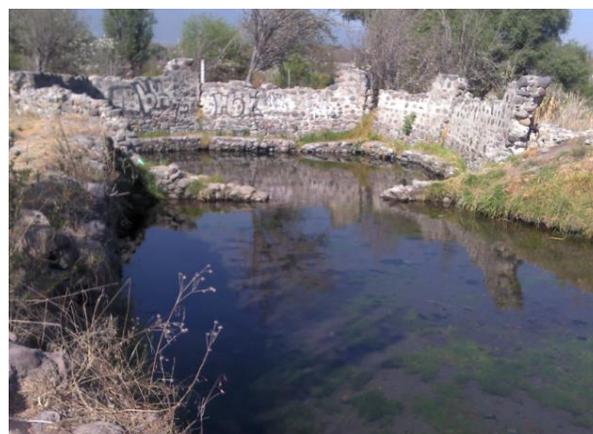
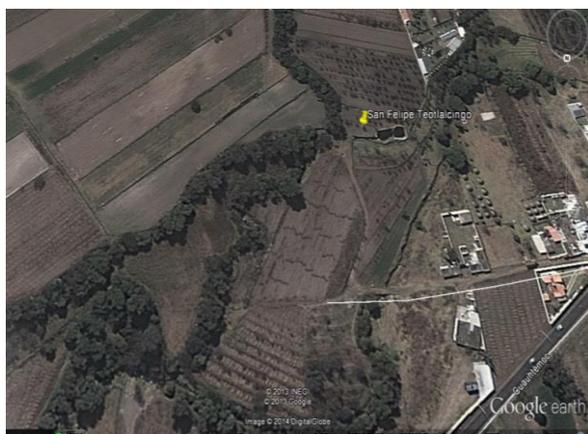
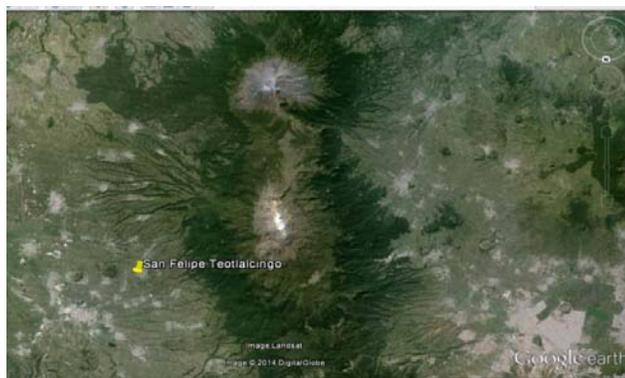
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**  
CARRERA DE BIOLOGÍA

**DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE SAN FELIPE TEOTLALCINGO**

**Fecha: 16 de mayo de 2013 y 01 de marzo 2014**

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Se encuentra a una altitud de 2382 m y de acuerdo con la tipología altitudinal se clasifica en altura media por estar en el intervalo entre 1000 y 2500 m, se localiza geográficamente en las siguientes coordenadas  $19^{\circ} 14.39'$  y  $98^{\circ} 29.388'$ . El uso de suelo es agrícola donde los cultivos principales son maíz y árboles de pera.



Ubicación geográfica y vista panorámica del manantial de San Felipe Teotlalcingo

En este sitio se encuentra un manantial que es aprovechado para el riego de los cultivos y el agua del río que deriva del manantial, se lleva hacia otros cultivos, su orientación va de oeste a este. El agua de éste manantial perpendicular a otro cauce cuyas aguas se encuentran contaminadas porque recibe descargas

domésticas de poblaciones ubicadas en sitios más altos. Sin embargo las aguas de ambos cauces no se mezclan fortuna en lugar. La clasificación geomórfica de ambos arroyos según Rosgen (1994) tiene categoría F< 2% por poseer un desnivel en gradiente altitudinal suave. El terreno es casi plano con una pendiente de 1.8 %, con suelo de tipo Fluvisol con espesor entre 1.2 y 6.5 dm con textura areno-limosa a lo largo de un perfil del suelo sin diferenciación de horizontes dado que el material lo constituyen depósitos fluviales recientes. La forma del relieve es convexo, el socavamiento de materiales que el arroyo realiza permite observar rocas de tipo riolitas y andesitas. El pH del suelo determinado mostró valores alrededor de 5.7, no se observó presencia de aluminio activo (Alofanos). La temperatura ambiental fue de 8.3°C con una humedad de 50.2%. La vegetación ribereña original fue totalmente eliminada del lado del manantial para el desarrollo de los cultivos y huertos de pera y manzana. Al lado del segundo arroyo aún se pueden encontrar árboles de capulín (*Prunus sp*) y tejocote alternado con *Clethra sp* y *Garrya sp* (árboles de 2 y hasta 10 m de altura) y sobre el margen de los arroyos se observó vegetación sub acuática

#### **DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE APATLACO 1**

**Fecha: 12 de abril de 2013 y 9 de noviembre de 2013**

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Apatlaco es uno de los sitios estudiados más altos con 3912 m de altitud ubicado al N del cono volcánico del Popocatepetl en las siguientes coordenadas geográficas. W 537974 y N 2 114968. (98° 38.356´ W y 19° 7.751´ N) con uso de suelo forestal y donde dominan el zacatonal montano con *Festuca sp* y *Muhlenbergia-sp sp* como especies principales encontrando también una presencia de *Lupinus sp*, (*Cirsium sp*) Rosa de los volcanes y en forma espaciada hacia el límite superior de la zona forestal se encuentra a *Pinus hartwegii*. En el intervalo de 30 m elegido para el diagnóstico del sistema ribereño, se observaron 8 árboles quemados y secos y 13 árboles caídos en una amplitud de aproximadamente 20 m. Dominan de los individuos de adultos (ocho) con 30 m de altura y DAP 181 y cuatro juveniles con un DAP de 49 cm con 30 m de altura y DAP 181 cm. Al momento del estudio se encontró una humedad ambiental de 33% y una temperatura de 11.3 °C. El relieve predominan los lomeríos cóncavo.



Ubicación geográfica, vegetación predominante y forma del terreno de Apatlaco 1

### DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE APATLACO 2

Fecha: 13 de abril del 2013 y 11 de noviembre 2013

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Se encuentra a una altitud de 3626 m, de acuerdo a la tipología altitudinal se clasifica como sitios de gran altitud y localiza geográficamente en las coordenadas geográficas de 19° 06.648' y 98° 37.591'. El uso de suelo es forestal y la vegetación característica en el estrato arbóreo es el bosque de pino con *Pinus hartwegii* como única especie y en el estrato arbustivo y herbáceo se encuentra, *Cirsium* sp (rosa de los volcanes) y zacatonal montano con dominancia de *Muhlenbergia* sp



Ubicación geográfica y vegetación más representativa de Apatlaco 2

La humedad ambiental al momento de la descripción fue de 30.4 % con temperatura ambiental entre 9.7 y 10 °C (Época de lluvias). La superficie del terreno tiene un relieve accidentado es terraceado y quebrado. El material geológico que se observó fueron rocas ígneas riolíticas, toba volcánica y andesita-dacíticas y pómez de las cuales se derivan para la zona un mosaico de suelos de tipo Leptosol esquelético y Andosoles vítrico y húmicos cuyo espesor estuvo entre < 1 dm y hasta más de 10 cm cuya profundidad va desde 1.5 hasta 10 dm, con textura limo-arenosa. El pH del suelo en campo que se obtuvo fue de 4.7 y 5.3 y la prueba del NaF de alófono señala una reacción positiva obteniendo presencia de aluminio activo. La pendiente del río fue de 15 % pero la de las laderas oscila entre 8 y 15%. El relieve característico de este sitio es cóncavo.



*Cirsium*

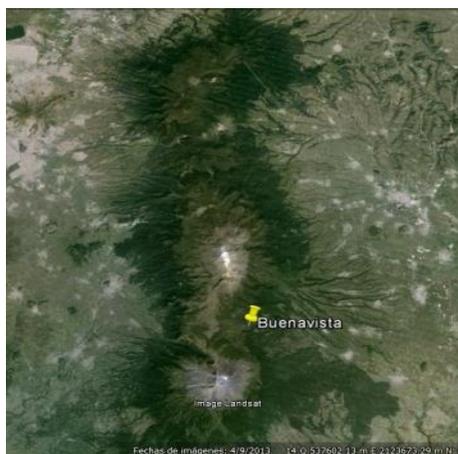
Vegetación predominante y morfología de Apatlaco 2

### DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE BUENAVISTA

Fecha: 15 de febrero 2013

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Este sitio se encuentra a una altitud de 3360 m snm, por la tipología altitudinal son considerada como ambientes altos, se localiza geográficamente en las coordenadas 19° 5.555 y 98° 36.223, en UTM 541987 y 2111174. La vegetación que se encontró fue arbórea, herbácea y arbustiva encontrando *Pinus hartwegii* *Salix* sp., *Senecio salignus*, *Bacharis* sp, *Cirsium* sp, *Lupinus* sp y *Alchemilla* sp y zacatonal montano con dominancia de pastos del género *Muhlenbergia* y presencia en el piso forestal de algunos individuos de la familia asteraceae.



Ubicación geográfica de Buenavista

El terreno tuvo una pendiente a lo largo del río de 15 % con una orientación de oeste a este en un relieve terracedo quebrado. El material geológico encontrado fue de rocas riolitas, andesitas, basaltos y piroclastos de ceniza volcánica y a partir de estos materiales se han formado suelos del grupo de los andosoles que ante su alto contenido de MOS y condiciones climáticas de alta humedad y baja temperatura podrían clasificarse como andosoles vítricos y húmicos que varían su profundidad de 40 cm y 60 cm hasta más de 100 cm, la textura que se encontró en el horizonte superior fue arenoso-limoso . El pH observado en campo osciló entre 4.5 y 5 con reacción positiva a la prueba de aluminio activo (intensa presencia de minerales amorfos alófono) lo que concuerda con su origen volcánico. La humedad ambiental fue de 40.2 % y una temperatura de 12.5°C.

#### DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE RIO APOL

**Fecha: 15 de febrero 2013**

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Se encuentra a una altitud de 3153 msnm, de acuerdo a la tipología altitudinal es considerado como ambiente alto, se encuentra en las coordenadas geográficas 19° 7.526, 98°34.959 en UTM 543897,2114768. La vegetación característica de este sitio consto de árboles, arbustos y herbáceas como *Pinus ayacahuite*, *Abies religiosa*, *Salvia elegans*, *Senecio angulifolius*, *Cestrum* sp., helechos como *Asplenium* sp y una especie de Adiantaceae.



Ubicación geográfica de Rio Apol

La pendiente a lo largo del río fue de 4° con un relieve quebrado la pendiente de las laderas son escarpadas. Se encontraron suelo de tipo ... el cual tiene un espesor de 80 a 100 cm y una textura arena-limoso. El pH en campo fue de 4.93 con potenciómetro y directo de 6, la prueba de alófono mostro presencia de aluminio activo. La humedad ambiente del sitio fue de 71.8% y una temperatura de 8.9°C.



Vegetación representativa y morfología de Rio Apol

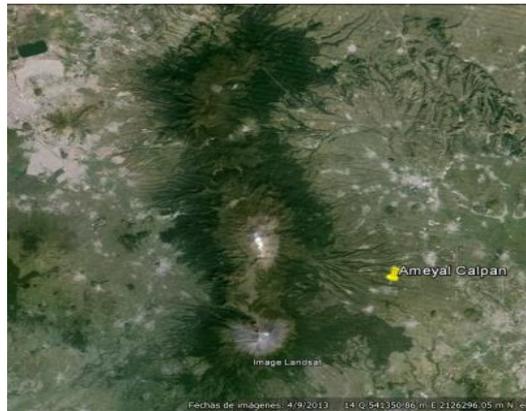
### DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE AMEYAL CALPAN

Fecha: 16 de febrero 2013

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

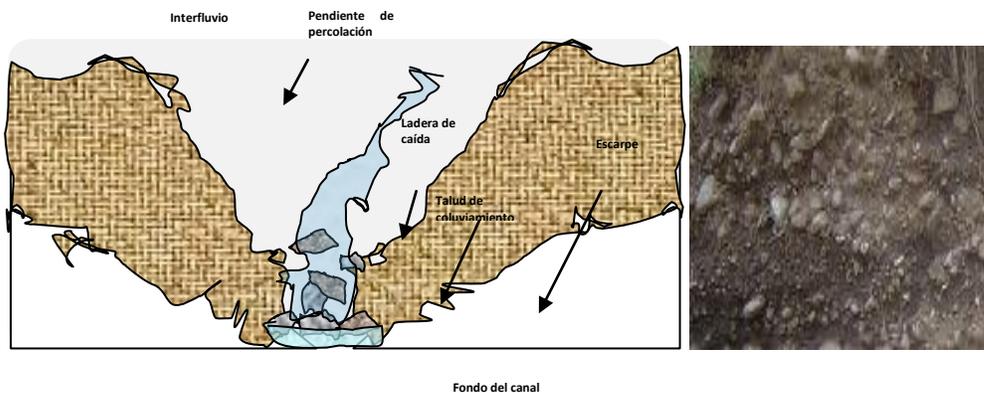
Es una zona de manantiales, que se encuentra a una altitud de 2357 la tipología altitudinal es considerada media, se encuentra geográficamente con las coordenadas UTM 556747 y 2113202.

El Talud del lecho del arroyo (alimentado por manantiales entubados y cuyo excedente continua alimentando el flujo de agua) es muy escarpado con pendiente  $>70\%$ , está formado por conglomerados de cantos rodados y en su base la alta humedad permite un buen desarrollo de briófitas, hepáticas, helechos de la familia Aspleniaceae y del género *Adiantum* sp,. La vegetación arbórea la componen algunos pinos de la especie *Pinus teocote*, especies del género en la parte media de la barranca y otras especies de *Quercus*, *Clethra mexicana* *Buddleja cordata* (tepozan) y de la familia Salicaceae algunos individuos de *Salix* sp. Entre los arbustos observados se tiene a *Cestrum* sp y otros de la familia Araceae la especie *Zantedeschia aethiopica* (alcatraz) encontrando también algunas gramíneas. A lo largo del curso del arroyo se observan afloramientos rocosos de tipo riolítico. Se tienen suelos de poca profundidad  $< 20$  cm en el lecho bajo los escasos sedimentos fluviales ante una muy disminuida corriente que mostró ese arroyo.



Ubicación geográfica de Ameyal Calpan

La pendiente del río es casi plana y se encontraron suelo de tipo fluvisol, con profundidades de 20 a 40 cm y textura arenosa, el relieve es convexo muy escarpado y quebrado. El material geológico que se observo fue riolita. El pH con potenciómetro fue de 7.19 en las laderas y en el lecho de 6.78, y de forma directa el pH fue de 6.8 en el corte de la ladera y en el lecho de 6.5, la prueba de alófono no indico presencia de aluminio activo en laderas, sin embargo en el lecho del río fue positiva la prueba. La humedad ambiente registrada fue de 50.4 % a una temperatura de 16.6 °C. En este sitio se observaron bancos ribereños con varios estratificaciones, por variadas crecidas de agua y en el cauce se observa mucho carbonato de calcio.



Elementos morfológicos de las laderas del sistema ribereño en Calpan, Puebla y vista de la pared del escarpe. Calle Alvaro Obregón Esq. Calle de la Amargura. Modelo de Dalrymple (1968).

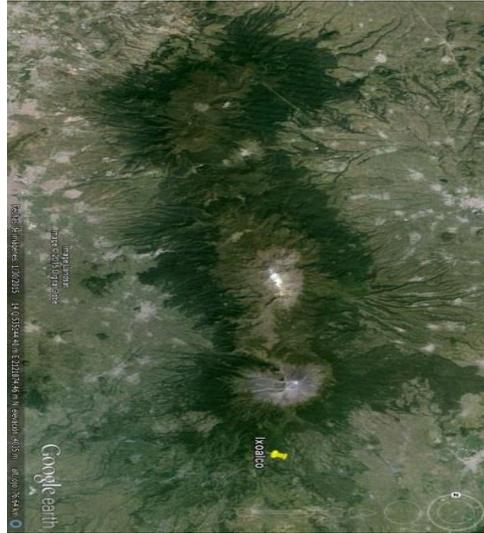
### DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE IZOALCO

Fecha: 15 de marzo 2013 y 6 de diciembre 2013

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Este sitio se encuentra a una altitud media de 2400 msnm con una tipología altitudinal considerada como media, geográficamente se encuentra en las coordenadas UTM 537034 Y 2092290. En este sistema el uso de suelo es para de producción de truchas, la vegetación que se encontró es arbórea y arbustiva contando con *Salix elegans*, *Salix sp*, *Alnus sp.*, *Clethra sp* y helechos, además de observar *Cupressus sp* para reforestar. Se encontró sobre el rio a seis organismos de *Alnus* en 10 m y 19 en 10 m, con un diámetro promedio de 26 cm. El perímetro a altura al pecho fue en promedio de 89 cm, 9 árboles de 89,

2 árboles de 102, se observaron alturas de 20 a 25 m. Clethra tuvo 15 m de altura con un perímetro de 83 cm.



Ubicación geográfica de Izoalco

La pendiente registrada sobre el río fue de 7.5 % el tipo de suelo fue andosol con una espesor que va de los 10 hasta los 30 cm, la textura fue arena de media a gruesa. El relieve fue de tipo cóncavo y el material geológico fueron riolitas y andesitas. El suelo obtuvo un pH de 4.33 con potenciómetro y 6.4 directo, la prueba de alófono indico poca presencia de aluminio activo. La humedad registrada fue de 73% con una temperatura de 15.8 °C. La temperatura del suelo promedio fue de 11.93°C. La orientación del río es de oeste a este.

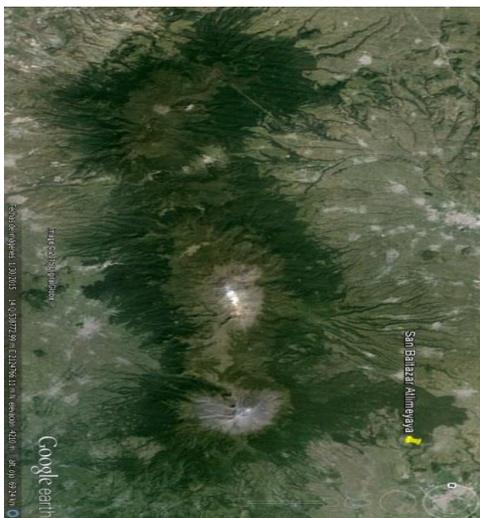


Vegetación representativa y morfología de Izoalco

**DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE ATLIMEYAYA****Fecha: 16 de marzo 2013 y 7 de diciembre 2013**

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Se encuentra a una altitud media de 2189 msnm en las siguientes coordenadas UTM 554590 y 2099403. Este sitio presenta gran impacto por el hombre, donde el uso de suelo es pecuario: producción piscícola zona de agostadero para ATO de caprino y bovino, por lo que solo se observó vegetación, herbácea arbustiva, acuática y arbórea como *Salix babylonica*.



Ubicación geográfica de Atlimeyaya

La pendiente del río fue de 6° considerada como moderadamente inclinado. El suelo es de tipo litosol y leptosol ándico con espesores de 10 a 60 cm con textura arenosa, el relieve del terreno fue plano. El material geológico que se encontró fueron rocas riolitas y andesitas. El pH que se obtuvo de potenciómetro fue de 6.80 y directo de 5.2 la prueba de alófono indico actividad baja de aluminio, la temperatura promedio del suelo fue de 12.8 °C. La humedad ambiental que se registro fue de 64.7% con una temperatura de 17.1°C. El río corre en una dirección de norte a sur.

**DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE SAN PEDRO LA CASCADA****Fecha: 16 de marzo 2013**

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Este río se encuentra a una altitud media de 2149 msnm, geográficamente se localiza en las coordenadas UTM de 554962 y 2097959. El uso del suelo es agroforestal, encontrando vegetación de pino encino,

nogal cultivo de haba, cultivos para forrajes y avena. El suelo fue de tipo fluvisol con espesores de suelo entre 10 y 70 cm, con materia geológico de andesitas y basaltos. La humedad ambiental fue de 9.35 % y una temperatura de 11.5 °C.



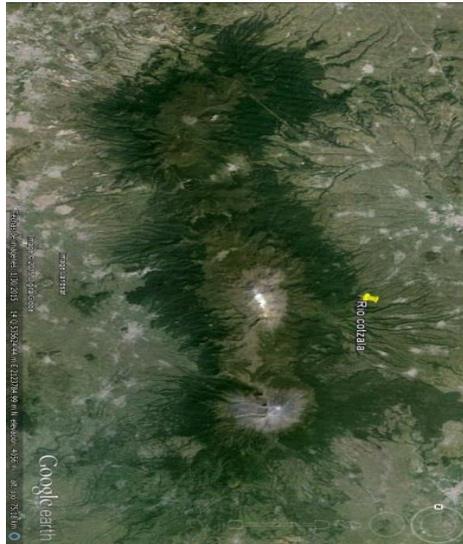
Ubicación geográfica de San Pedro la Cascada

### DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE RIO COTZALA

Fecha: 16 de mayo 2013

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Este sitio se encuentra a una altitud de 2809 msnm considerado en la tipología altitudinal como sitio alto se localiza geográficamente en las coordenadas UTM 54804 Y 2120772. La vegetación que se encontró fue arbórea y arbustiva principalmente como *Pinus ayacahuite*, *Salix elegans*, *Pinus pseudostrobus*, *Cupressus* sp, *Alnus jorullensis*, *senecio angulifolius*, *senecio* sp., y helechos.



Ubicación geográfica de rio Cotzala

El suelo es de tipo andosol húmico y andosol vítrico el relieve fue convexo. El material geológico de este sitio son rocas ígneas y riolitas, el pH con potenciómetro fue de 5.4. La humedad del ambiente registrada fue de 65.4 a 72 % y temperatura de 17°C. El rio se encuentra entubado pero aún existen arroyos secundarios que llevan agua, el sitio de estudio fue realizado donde se conectaban dos de estos arroyos.



Vegetación representativa de la zona de rio Cotzala

### DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE MANANTIAL RIO FRIO

Fecha: 14 de junio 2013 y 28 de febrero del 2014

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Se encuentra a los 3166 msnm es considerado un ambiente alto, se encuentra geográficamente en las coordenadas geográficas 98° 41.46', 19° 24.119'. La vegetación de este sitio es arbórea arbustiva y herbácea, encontrando bosque de pino encino y arbustos como *Senecio angulifolius* y *Baccharis* sp.



Ubicación geográfica de Ejido de rio frio, vegetación y morfología de Ejido de Rio Frio

La pendiente del rio es muy escarpada con una pendiente de 3.5 suelo de tipo Andosol nítrico extra ribereño y Andosol húmico vítrico en la ribera, con una profundidad de 10 a 70 cm y textura arena y limo a profundidades mayores. El material geológico que se encontró constaba un gran afloramiento de rocas riolitas el pH con potenciómetro fue de 5.2. La humedad ambiente del sitio que se registro fue de 60.5% a una temperatura de 10.2 y 12 ° C.

### DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE SANTA RITA TLAHUAPAN

Fecha: 6 de septiembre 2013

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Es una Manantial ubicado a una altitud de 2739 msnm y 2724msnm, es considerando por la tipología altitudinal como ambientes altos, se localiza con las siguientes coordenadas en UTM de 5041723 y

2136988, sus coordenadas geográficas son  $19^{\circ} 19.692'$  y  $98^{\circ} 36.188'$ . La vegetación natural de este sitio es principalmente arbórea contando *Cupressus* sp, *Pinus patula* de 8 a 9 años y *Abies religiosa* que fueron introducidos para reforestar, se obsevo *Alnus* sp y también se encontraron especies arbustivas como *Senecio angulifolius*, *Tagetes* sp y una diversidad de helechos.



Ubicación geográfica de Santa Rita Tlahuapan

La pendiente del sitio donde se encontraba el manantial es prácticamente plano con las laderas cóncavas de pendientes de  $5.2^{\circ}$  clasificándolas como fuertemente inclinadas. Los suelos son de tipo litosoles y regosoles con profundidades de 40 cm a más de un metro, con textura arenosa y el material geológico observado fue de riolitas y andesitas roca muy blanda con pomex no intemperizado. El pH tomado en campo fue 6.45, la prueba de alofano determinada nos indicó que presencia de aluminio activo. El contenido de humedad del sitio es de 57.7 % y se registró una temperatura de 23 a  $22.8^{\circ}\text{C}$ . La exposición a la que se encontraban el río era de oeste a este. En los *Pinus patula* tiene edad aproximada de 12 años (se miden los años por los nudos)



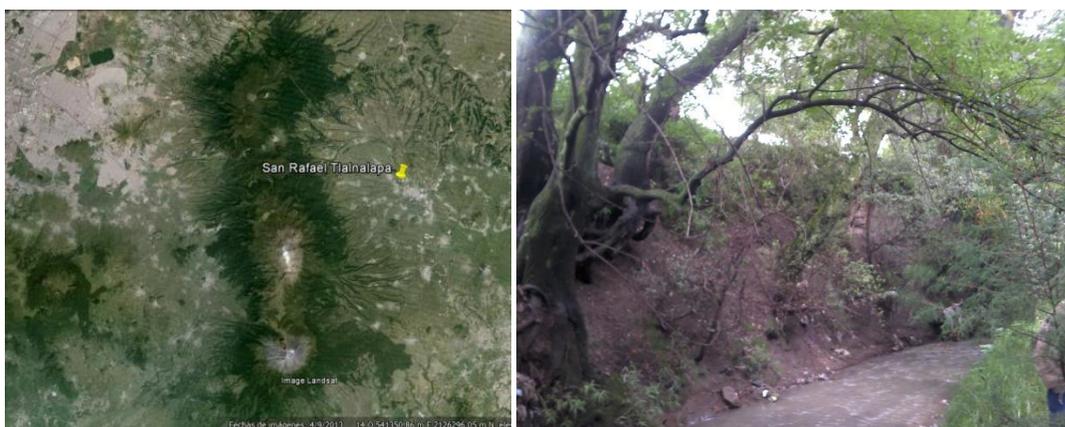
Vegetación representativa y morfología de la zona de Santa Rita Tlahuapan

### DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE SAN RAFAEL TLANALAPA

Fecha: 6 de Septiembre 2013

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Es un río que se encuentra a una altitud de 2272 msnm considerada como altura media localizado con las siguientes coordenadas UTM 556337 y 2133659. Este río es alimentado con aguas negras y con basura en las riberas, es continuo a casa habitación y algunos campos agrícolas. La vegetación es arbórea y arbustiva encontrando encinos, pinos, especies de *Garrya sp*, *Cupressus sp* y *Alnus sp*.



Ubicación geográfica, vegetación y morfología de San Rafael Tlanalapa

La pendiente fue de 22° o 42%, el tipo de suelo fue fluvisol eutrico con un espesor de mayor a 60 cm con textura franco arenosa. El relieve es cóncavo. El material geológico encontrado fue andesitas y conglomerado basáltico. El pH fue de 6.1 y existió aluminio activo en el lugar. El porcentaje de humedad registrado fue de 74.9 a 88.1% y la temperatura fue de 14.8 a 14.4 °C.

### DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE TRUCHERO XOPALLICAN

Fecha: 7 de septiembre 2013

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Este truchero se encuentra en las siguientes coordenadas UTM 547758, 2130123, se encuentra a una altitud de 2546 msnm clasificada como altura media. El río fue entubado para la producción de truchas. El suelo recolectado se tomó en el lomo de la cañada del río. La vegetación con que se contaba es arbórea, arbustiva y herbácea encontrando *Quercus sp*, *Quercus crassipes*, *Quercus crassifolia* y *Alnus turoleensis*, en ladera norte encontramos cultivo de maíz y en la ladera sur cultivo de haba.

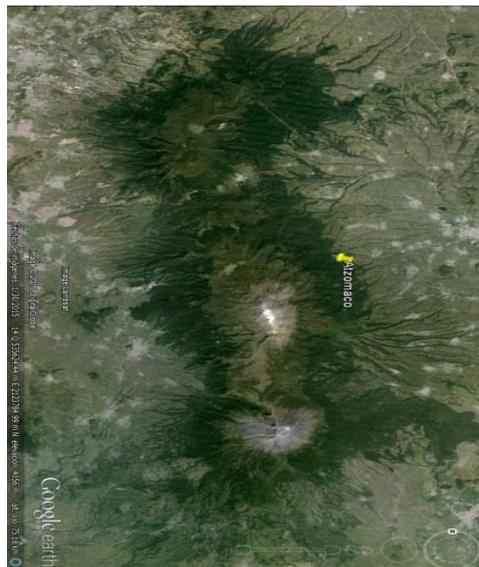
La humedad obtenida fue de 70.3 % y una temperatura de 13.3 °C. El material geológico son riolitas subyacentes a suelos andosoles y cambisoles, el pH registrado fue de 5.1 . La pendiente del rio fue casi plana y en laderas totalmente escarpadas, el relieve del sistema ribereño es cóncavo y el rio tiene una exposición de este a oeste, en la ladera sur el espesor del suelo es menor de 10 cm, mientras que en la ladera norte el horizonte A es de 20 a 25 cm

### DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE ATZOMACO

Fecha: 20 de septiembre 2013

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Es un manantial ubicado a una altitud de 2744 msnm considerada como ambientes altos con las coordenadas UTM 544073 y 2128859. Se encuentra en una bosque de pino encino y una gran diversidad de vegetación arbórea y arbustiva como *Pinus teocote*, *Garrya* sp y *Baccharis* sp, como vegetación secundaria *Alnus* sp, *Cupressus* sp y madroño.



Ubicación geográfica de Atzomaco

La pendiente que obtuvo fue de 3.1° a lo largo del rio y la pendiente de las laderas fue muy quebrado, el tipo de suelo fue de... con profundidad promedio de 47 cm y textura que van desde franco arenoso y franco limoso. El relieve es cóncavo y se cuenta con roca riolita como material geológico. El pH tomado fue de 5.2, la prueba de alofano indico presencia de aluminio activo. La humedad registrada fue de 77.4

% y una temperatura de 19.6 °C, la temperatura de suelo se registró de 15.1 °C. Este río tiene una exposición que va del sur al este y norte a sur.



Vegetación representativa y morfología de la zona de Atzomaco

### DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE ZOQUITITLA Y PALO OBISPO RIO

Fecha: 21 de septiembre 2013

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Es un río con una altura de 2928 msnm considerado como sistemas altos, sus coordenadas UTM son 543599 y 2128094. La vegetación es de pino encino, encontrando también *Pinus pseudostrobus* y *Abies religiosa*, además de una gran diversidad de vegetación arbustiva y herbácea.



Ubicación geográfica de Zoquititla

La pendiente a lo largo del río es de 29% considerada como escarpada, la pendiente de las laderas fueron de 7° el relieve del sitio es cóncavo irregular. Se encontraron suelos de tipo leptosol, andosol y paleosuelos, con profundidades de 20 a más de un 1m, texturas franco arenosas y limosas. El material geológico observado fue con rocas andesíticas con anfíboles y riolitas. El pH en campo fue de 6.05 y la prueba de aluminio activo nos indicó ausencia de aluminio activo. La humedad que se registro fue de 88.7 % y una temperatura de 14.6 °.



Vegetación representativa y morfología de Zoquititla

### DESCRIPCIÓN ECOLÓGICA DEL AMBIENTE RIBEREÑO DE PILARES

Fecha: 15 de junio del 2013

Descriptores: Grupo de estudio de Ecosistemas Ribereños de la Línea de Investigación: **RELACIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN EN EL MANEJO DE CUENCAS.**

Este sitio se encuentra a una altura de 4059 msnm, y se localiza con las siguientes coordenadas geográficas 539805 W, 212276 N. La vegetación presente en este sitio es dominada por zacatonal montano, además de observar *Pinus hartweggi* y rosa de los volcanes. La pendiente que se obtuvo fue de 9 % moderadamente inclinado, con un relieve cóncavo. El material geológico fue la cual se observó superficial. La humedad ambiente fue de 65.2 % y se registró una temperatura de 12.5 °C.



Ubicación geográfica vegetación representativa y morfología de Pilares