



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**CONTRIBUCIÓN DE LA ACTIVIDAD DE LA
UREASA A LA LIBERACIÓN DE NITRÓGENO
EN SUELOS DE USO AGRÍCOLA Y FORESTAL**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

B I Ó L O G O

PRESENTA

ENRIQUE SUASTEGUI MÉNDEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. GERARDO CRUZ FLORES



MEXICO, D. F

MARZO 2009



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 mi madre, Rosalba Méndez Lucero. Por ser la mamá más maravillosa del mundo y por quien luchare tan fuerte como ella lo ha hecho siempre por mí. Por su apoyo incondicional, consejos y valores que me ha infundado desde siempre. Gracias por tu confianza y por creer en mí.

A mi padre, Víctor Suastegui Flores. Ese hombre al que le he aprendido que para conseguir lo que uno quiere siempre hay que hacerlo con trabajo, honradez y humildad, es un gran ejemplo a seguir.

A mis hermanos Gabriel, Ángel, Beatriz y mi sobrino Dany por ser el parte fundamental en mi vida y por la oportunidad de tener a seres tan maravillosos con quien compartir lo que aspiro ser.

AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Por haberme cuidado y guiarme en los momentos más difíciles, y por la oportunidad de haber estudiado esta maravillosa profesión. Por la familia y amigos en el recorrido de esta aventura... por todo... gracias.

A mi familia:

A mis tías y tíos que junto con mis primos me han dado una sólida base... una familia.

A la UNAM por su generosidad, grandeza y sobre todo por sentir el orgullo de ser parte de esta gran comunidad universitaria.

A la FES Zaragoza, por todo lo aprendido en las aulas, laboratorios y salidas a campo.

Al Dr. Gerardo Cruz Flores por ser una de las personas que más ha contribuido en mi formación académica, por ser una persona que cuenta con una calidez humana incomparable, por todos los momentos compartidos y por ser un gran Amigo.

Al M. en C. Efraín Ángeles Cervantes. Por su amistad. Gracias por compartir conmigo sus conocimientos, no solo académicos, también de la vida misma.

Al Jurado:

M. en C. Ramiro Ríos Gómez, Dr. Gerardo Cruz Flores, Elvia García Santos, M. en C. Efraín Ángeles Cervantes y M. en C. Miguel Castillo Gonzales por enriquecer el contenido de este trabajo.

Por supuesto a todos mis maestros que durante mi formación contribuyeron con sus conocimientos, por su tiempo, gracias.

A mi gran amigo Elid López Vargas, por el placer de conocernos y las largas horas de risas, aventuras compartidas y porque aunque en este momento la vida nos lleva por diferentes caminos no me cabe duda que siempre estemos juntos.

A Héctor Eduardo Benítez Alemán y Erika Claudia Alanís Manríquez por que juntos hemos compartido y cultivado la maravillosa amistad que hoy día tenemos. Gracias

A Yahir un gran amigo con el que se que puede contar bajo cualquier circunstancia.

A Ricardo Guerrero Ortiz, Juan Espinoza, Oso, Luis, Norma, Normita, Adriana, Yazmin, Casandra, Monse, Nataly, Liliana por la amistad que cada día seguimos cultivando.

A mis dos grandes amigas, Claudia y Karla. Que a pesar de que no siempre estemos en contactos, la amistad es firme y porque aun que no siempre las vea se que están ahí.

A Francisco Cohetero y Belem Soriano, por que juntos compartimos momentos inolvidables y porque parte de este trabajo es suyo también.

A mis compañeros y amigos del Laboratorio de Edafología y Fisiología de la Nutrición Vegetal, Miguel, Margarita, Nancy, Cintia, Mario, Keta, Beyi, Paco, Evelyn, Lalo, Mike. Por compartir conmigo sus invaluable conocimientos y esas inolvidables salidas a campo.

A mis compañeros y amigos, Beka, Ale, Nahum y Memo

A todas aquellas personas que dejaron algo en mí en el transcurso de la carrera: *ustedes saben quiénes son, gracias por escucharme y estar conmigo en todo momento, su amistad lo hizo más fácil*

GRACIAS.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1 INTRODUCCIÓN	1
2 MARCO TEÓRICO	3
2.1 Nitrógeno	3
2.2 Actividad Enzimática	8
2.3 Ureasa del suelo	9
2.4 Reacción de la urea en el suelo y proceso de volatilización	13
2.5 El suelo	14
2.6 Funciones del suelo	15
2.7 Concepto de suelo	15
2.8 Calidad del suelo	16
2.9 Indicadores de calidad	17
2.9.1 Evaluación de la calidad del suelo	18
3.1 Cambio de uso de suelo	19
3.2 Crecimiento de la frontera agropecuaria	20
3.3 Suelos forestales	21
3.3.1 Los bosques templados de México	22
3.3.2 Actividades humanas en los bosques templados	25
3. JUSTIFICACIÓN	26
3.1 Supuestos	27
4. HIPÓTESIS	27
5. OBJETIVOS	28
6. MATERIALES Y MÉTODOS	29
6.1 Descripción de la zona de trabajo	29
6.2 Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl (PNIP)	29
6.3 Parque Nacional Zoquiapan y Anexas (PNZA)	31

6.4 Área Natural “Mil Cumbres” (ANMC)	33
6.5 Toma de muestras de suelo	35
6.6 Toma de la muestra foliar	36
6.7 Pretratamiento de muestras	37
6.8 Análisis físico y químico del suelo	37
6.9 Análisis químico de planta	38
7.1 Cuantificación de la actividad ureasa	38
7.2 Diagrama de flujo: muestreo, recolecta y análisis de datos, de los sitios de estudio	40
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
7.1 Descripción fisiográfica general de los sitios de estudio	41
7.1.2 Parque Nacional Zoquiapan y Anexas	41
7.1.3 Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl	43
7.1.4 Área Natural Mil Cumbres	46
7.2 Actividad de la enzima ureasa	47
7.2.1 Actividad ureasa en las zonas de estudio	47
7.2.2 Actividad de la ureasa en suelos del PNZA	49
7.2.3 Actividad de la ureasa en suelos del PNIP	54
7.2.4 Actividad de la ureasa en suelos del Área Natural Mil-cumbres	58
7.3 Propiedades químicas suelo	62
7.3.1 Parque Nacional Zoquiapan y Anexas	62
7.3.2 Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatépetl	64
7.3.3 Área Natural Mil Cumbres	66
7.4 Propiedades físicas del suelo	73
7.4.1 Parque Nacional Zoquiapan y Anexas	73
7.4.2 Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatépetl	75
7.4.3 Área Natural Mil Cumbres	78
7.5 Análisis estadístico	80
8. CONCLUSIONES	85
9. LITERATURA CITADA	86
10. ANEXOS	96

ÍNDICE DE FIGURAS	Página
Figura 1. Ciclo del N en el suelo	3
Figura 2. Reacción de hidrólisis de la urea	10
Figura 3. Actividad de la ureasa en la hidrólisis de sustratos	11
Figura 4. Localización de enzimas del suelo	12
Figura 5. Distribución de los climas templados en México	23
Figura 6. Panorámica del Parque Nacional Izta-Popo	29
Figura 7. Localización geográfica del Parque Nacional Izta-Popo y el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas	32
Figura 8. Localización geográfica de las zonas de estudio	34
Figura 8. Submuestra de suelo 0-10 cm	35
Figura 9. Submuestra de suelo 0-20 cm	35
Figura 10. Determinación de la actividad ureasa (AU)	39
Figura 11. Titulación para determinar la concentración de la actividad enzimática	39
Figura 12. Bosque de pino en Zoquiapan, ecosistema típico del eje neovolcánico	41
Figura 13. Zona agrícola adyacente al bosque	41
Figura 14. Perfil de suelo característico del PNIP (Andosol)	43
Figura 15. Actividad ureasa y la relación de la MOS con el Nt-suelo en las Zonas de Estudio	47
Figura 16. Actividad ureasa en suelos de uso forestal y zonas agrícolas adyacentes al PNZA	49
Figura 17. Distribución altitudinal de la actividad ureasa y el nitrógeno total en el PNZA	50
Figura 18. Distribución de la actividad ureasa con el tipo de vegetación en el PNZA	51
Figura 19. Distribución de la actividad ureasa con respecto a la humedad en el PNZA	52
Figura 20. Distribución altitudinal de la actividad ureasa con respecto al pH en el PNZA	53
Figura 21. Actividad ureasa en suelos de uso forestal y zonas agrícolas adyacentes al PNIP	54
Figura 22. Distribución altitudinal de la actividad ureasa en el PNIP	55
Figura 23. Distribución de la actividad ureasa con el tipo de vegetación en el PNIP	56
Figura 24. Distribución altitudinal de la actividad ureasa con respecto al pH en el PNIP	57
Figura 25. Actividad ureasa en suelos de uso forestal y zonas agrícolas adyacentes al ANMC	58
Figura 26. Distribución altitudinal de la actividad ureasa en la ANMC	59

Figura 27. Distribución de la actividad ureasa y el nitrógeno total en la ANMC	60
Figura 28. Distribución de la actividad ureasa con el tipo de vegetación en la ANMC	61
Figura 29. Materia orgánica del suelo en las zonas de estudio	67
Figura 30. Porcentaje de materia orgánica del suelo de uso forestal y zonas agrícolas adyacentes en las áreas de estudio	68
Figura 31. Porcentaje de Nitrógeno total del suelo en las zonas de estudio	69
Figura 32. Porcentaje de Nitrógeno total de acuerdo con el tipo de uso del suelo en las áreas de estudio	70
Figura 33. Porcentaje de Nitrógeno foliar en las zonas de estudio	71

ÍNDICE DE CUADROS	Página
Cuadro 1. Datos de campo de unidades ecológicas del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas	42
Cuadro 2. Datos de campo de las unidades ecológicas del Parque Nacional Izta-Popo	44
Cuadro 3. Datos de campo de las unidades ambientales en el Área Natural Mil Cumbres	46
Cuadro 4. Actividad de la ureasa y parámetros evaluados en las zonas de estudio	48
Cuadro 5. Parámetros químicos de suelo en el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas	62
Cuadro 6. Parámetros químicos del suelo del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl	65
Cuadro 7. Parámetros químicos del suelo en el Área Natural Mil Cumbres	66
Cuadro 8. Parámetros físicos de suelo del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas	74
Cuadro 9. Parámetros físicos del suelo del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl	76
Cuadro 10. Parámetros físicos del suelo del Área Natural Mil Cumbres	79
Cuadro 11. Coeficientes de correlación entre la actividad ureasa (AU), con las propiedades físicas, químicas del suelo	80
Cuadro 12. Pruebas de significancia de la actividad ureasa en las zonas de estudio	81
Cuadro 13. Cantidad de NH_4^+ liberado por la AU en cada una de las tres ANP	82
Cuadro 14. Componentes Principales de las propiedades del suelo	83

RESUMEN

El cambio de uso del suelo provocado por actividad humana no planeada, influye en la degradación y disminución de la calidad del suelo, por lo que el objetivo de esta investigación fue evaluar los cambios de la actividad ureasa y su efecto en la liberación de amonio en suelos forestales y de uso agropecuario. Esta investigación se realizó en bosques templados del sistema volcánico transmexicano en tres Áreas Naturales Protegidas de los Parques Nacionales Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNIP) y Zoquiapan y Anexas (PNZA) abarcando una porción de los estados de México, Puebla y Morelos y en el Área Natural Mil Cumbres (ANMC) entre los límites de los Estados de México y Michoacán. Se seleccionaron unidades ambientales con apoyo de cartografía y dentro de ellas se trazaron cuadrantes paralelos a la pendiente de 20×50m para coleccionar muestras de suelo a dos profundidades; 0-10cm para el estudio de la actividad ureasa y de 0-20cm para caracterizar sus propiedades físicas y químicas. Además de los ensayos de actividad ureasa (Tabatabai, 1994), se realizaron análisis de pH, textura, densidad del suelo, materia orgánica (MO) y N-Total. Los suelos forestales y agrícolas en las tres zonas de estudio, tuvieron pH entre 5 y 7, la textura fue principalmente franco-arenosa en PNZA y PNIP y franco limosa en Mil-Cumbres. La ANP con mayor AU fue el PNZA ($0.0060 \text{ meq NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$), seguida del PNIP ($0.0043 \text{ meq NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) y finalmente, con la menor actividad ureasa estuvo el ANMC ($0.0028 \text{ meq NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Los cambios en uso del suelo (uso forestal a uso agrícola), generan disminución de materia orgánica del suelo y en relación con el objetivo general, se encontró que la AU fue mayor en suelos forestales en comparación con los de uso agrícola por lo que la AU puede ser utilizada como un indicador para evaluar su calidad.

Palabras Clave: Actividad ureasa, Uso de suelo, Indicadores de calidad del suelo

ABSTRACT

The land-use change caused by human activity without planning causes of degradation and declining soil quality, therefore the objective of this research was to assess changes in the urease activity and its effect on the release of ammonium in soils forest and agricultural use. This research was conducted in three Protected Areas of temperate forests in Volcanic Transmexican System of National Parks Iztaccihuatl Popocatepetl (PNIP) and Zoquiapan and Annexas (PNZA) covering a portion Mexico, Puebla and Morelos states and the Natural Area Mil Cumbres (ANMC) between Mexico and Michoacan states boundaries. Were selected with cartography support, environmental units and within them, parallel to the slope, were drawn quadrants of 20×50m to collect soil samples from two depths, 0-10cm for the study of urease activity and 0-20cm to characterize their physical and chemical properties. Further tests of urease activity (Tabatabai, 1994), analyzes pH, texture, soil density, organic matter (OM) and N-Total. Agricultural and forest soils in the three study areas were between pH 5 and 7, the texture was mainly sandy loam in PNZA and PNIP and silt loam in Mil Cumbres. ANP was the most urease activity PNZA ($0.0060 \text{ meq NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$), followed by PNIP ($0.0043 \text{ meq NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) and finally with the lowest urease activity was ANMC ($0.0028 \text{ meq NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Changes in land use (forest to agricultural use), generating decline of soil organic matter and in relation to overall objective, we found that urease activity was higher in forest soils in comparison with the agricultural use and therefore can be used as an indicator to evaluate soil quality.

Key words: Urease activity, change land-use, soil quality indicators

1. INTRODUCCIÓN

La ureasa es una enzima que participa en el proceso de hidrólisis de la urea adicionada al suelo o nativa, es un factor crítico en la regulación de éste elemento en el ecosistema forestal, debido a que existe una correlación significativa entre N de biomasa microbiana con el N mineralizable y la actividad ureasa (Zantua *et al.*, 1997, Hassett y Zak, 2005). La principal función de esta enzima es actuar sobre enlaces C-N, en enlaces no peptídicos y en amidas lineales, rompiendo dicho enlace en secuencias de dos, donde el carbamato es el compuesto intermedio en la reacción, de manera que éste es el sustrato obligado para el segundo paso de la reacción hidrolítica total (Tabatabai, 1994; Pascual *et al.*, 2002).

La ureasa (EC 3.5.1.5) es una de las diferentes enzimas que existen en el suelo y pertenece al grupo de las amidohidrolasas. La actividad de ésta enzima, es el resultado de la reserva o acumulación de la misma, excreción de las raíces y la proliferación de microorganismos con la capacidad de sintetizarla (Tabatabai, 1994; Bachmeier *et al.*, 2002).

En nuestro país, los bosques templados proporcionan tanto bienes como servicios ambientales para el hombre. Así mismo, tienen gran importancia histórica, socioeconómica y desde luego biogeográfica-ecológica (Challenger, 1998). Los suelos sirven como medio para el sustento de la vegetación, son cuerpos naturales que constan de materia mineral y orgánica en equilibrio dinámico con variables cantidades de agua y aire. Los suelos forestales presentan características especiales que provienen de la influencia de la hojarasca o humus forestal, raíces de árboles y una amplia gama de organismos específicos, cuya distribución y abundancia depende de la presencia de dicha vegetación (Bockheim, 1991).

Evaluar la calidad de un suelo resulta sumamente importante aunque la intrincada red de interacciones presentes entre los factores bióticos y abióticos que controlan procesos de tipo físico, químico, biológico y bioquímico realizados en el suelo, ofrece un panorama que indica lo complicado que resulta evaluar la calidad de un suelo y su relación con la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Doran y Parkin (1994) definen a la calidad del suelo como “su capacidad para funcionar dentro de un ecosistema determinado para sostener la productividad biológica, mantener la calidad del ambiente, la vegetación y la fauna”.

Las diferentes pérdidas de material nutritivo del suelo atribuibles al lavado, escorrentía y erosión, la disminución de N debida a procesos desnitrificantes y la permanente extracción de P, K, Ca y demás nutrientes esenciales, que realiza la flora y la fauna, influyen sobre la cantidad y balance de nutrientes o sustancias químicas presentes, lo que origina deficiencias nutrimentales o toxicidad que influyen negativamente sobre el crecimiento (Cruz, 2003).

El N es un elemento que sufre transformaciones durante los procesos biológicos de mineralización que influye sobre su disponibilidad para la vegetación, en el caso de la ureasa, Sall y Chote (2002) mencionaron que en general, las enzimas del suelo juegan un papel importante en la descomposición de la materia orgánica del suelo y sobre el ciclo de nutrientes por lo que, la medición de su actividad, se puede utilizar como indicador de fertilidad. De esta manera, conocer qué tan bueno es un suelo, es prioritario, para localizar los problemas puntuales de cada suelo, dar solución a los mismos y realizar un programa de mejoramiento, restauración y estabilidad, no solo del suelo sino del sistema del que forma parte.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 NITRÓGENO

De entre los diferentes elementos nutritivos de los vegetales, la cantidad de nitrógeno en el suelo es generalmente pequeña, mientras que la consumida anualmente es comparativamente grande. A veces, el N del suelo es demasiado soluble y así puede perderse por drenaje o se volatiliza en la desnitrificación y en otras, es definitivamente inasimilable por las plantas superiores, por lo que el nitrógeno es un importante nutrimento que no sólo ha de ser conservado, sino incluso regulado (Buckman y Brady, 1991).

El ciclo global del nitrógeno está constituido por cinco fases primarias: mineralización, nitrificación, desnitrificación, fijación biológica e inmovilización (Figura 1). La actividad humana ha influido en la mayoría de los procesos que componen estas fases; en especial, la fijación del abundante y estable N_2 , que representa 79% de la atmósfera en formas aprovechables para los cultivos (Echegaray-Alemán, 1995, citados por Delgadillo *et al.*, 2005; Deforest *et al.*, 2004).

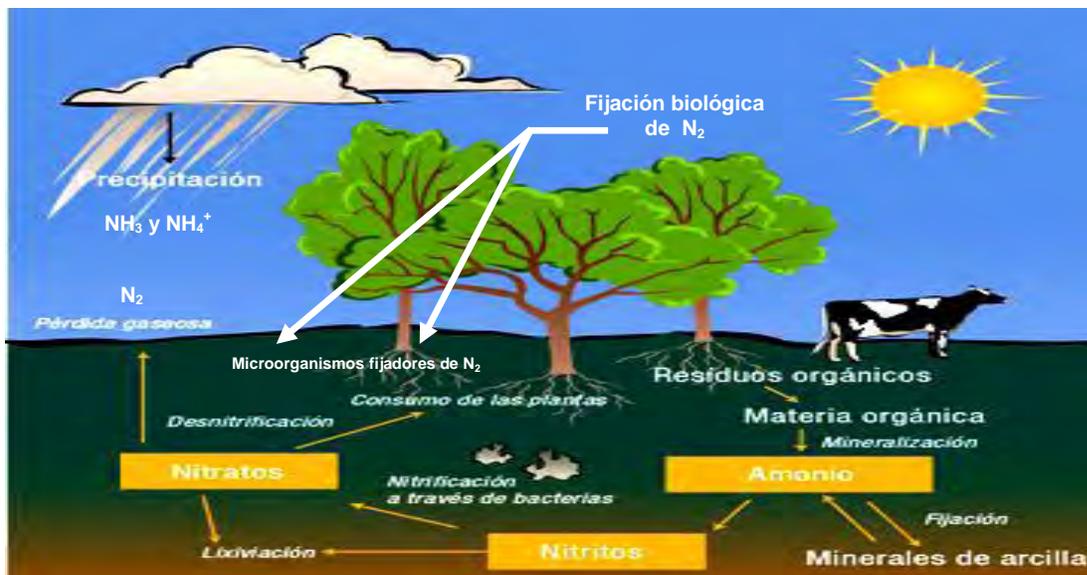


Figura 1. Ciclo del N (Adaptado de NCAR).

En todos los suelos existen al cabo del año considerables entradas y salidas de nitrógeno, acompañadas de muchas transformaciones complejas. Algunos de estos cambios pueden controlarse por el hombre, mientras otros están más allá de su control. El nitrógeno incorporado en suelos cultivables procede de materiales como restos de cultivos, abonos verdes, estiércol, fertilizantes comerciales, sales amónicas y nitratos por precipitación. La salida se debe a la remoción del cultivo, al drenaje, a la erosión y pérdida en condición gaseosa, tanto en forma elemental como en compuestos amónicos. Gran parte del nitrógeno añadido al suelo sufre transformaciones antes de ser incorporado. En condición orgánica, está especialmente sujeto a cambios complejos. Las proteínas se convierten en varios productos de descomposición (Buckman y Brady, 1991).

El desarrollo de las plantas depende, en gran medida, de un adecuado suministro de N para la formación de aminoácidos, proteínas y otros constituyentes celulares. Asimismo, el contenido de N se relaciona estrechamente con la capacidad fotosintética, ya que el N que constituye la clorofila, proteínas del tilacoide y enzimas principalmente RUBISCO representa alrededor de 75% del nitrógeno orgánico en la hoja (Bolton y Brown, 1980; Evans, 1983 citados por Trejo *et al.*, 2005). La mayoría de las plantas pueden utilizar diversas formas de nitrógeno, incluyendo amoníaco volátil (NH_3), óxidos de N (NO_2), N mineral (NO_3^- y NH_4^+) y N orgánico (péptidos, aminoácidos y otros) (Von Wirén *et al.*, 1997 citados por Trejo *et al.*, 2005). Las plantas también absorben urea, la cual contiene 46% de nitrógeno en forma ureica, y está en especial indicada para su aplicación foliar. Debido a los altos requerimientos de N por las plantas, la fertilización nitrogenada representa el principal insumo en la agricultura mundial. Se estima que cada año se aplican cerca de 90 millones de toneladas de N para la producción agrícola en el mundo, mientras que el total de fertilizantes aplicados asciende a 150 millones de toneladas.

El N, es un elemento básico de la vida, pero el nitrógeno gaseoso debe ser transformado en una forma químicamente utilizable antes de poder ser usado por los organismos vivos. Esto se realiza por microorganismos como bacterias simbióticas del género *Rhizobium*, actinomicetos del género *Frankia* y algas verde azules a través del ciclo del nitrógeno, quienes lo transforman a amoníaco o nitratos.

La fijación biológica, responsable de la mayor parte del proceso fijación del N a formas asimilables, se produce por la acción de bacterias libres fijadoras del nitrógeno, bacterias simbióticas que viven en las raíces de las plantas (leguminosas y alisos). El nitrógeno fijado en forma de amoníaco y nitratos es absorbido por microorganismos y las plantas y es incorporado a sus tejidos. Después, el nitrógeno recorre la cadena alimenticia desde las plantas a los herbívoros, y de estos a los carnívoros. Cuando las plantas y los animales mueren, los compuestos nitrogenados se descomponen produciendo amoníaco, por el proceso de amonificación (Manson y Falkengren 2003). Parte de este amoníaco se disuelve en el agua o permanece en el suelo, donde los microorganismos lo convierten en nitritos o nitratos al llevarse a cabo la nitrificación. Los nitratos pueden almacenarse en el humus en descomposición o desaparecer del suelo por lixiviación, siendo arrastrado a los arroyos y los lagos (Castro *et al.*, 2006). Otra posibilidad es su transformación en N₂ mediante la desnitrificación y volver a la atmósfera. En los sistemas naturales, el nitrógeno que se pierde por desnitrificación, lixiviación, erosión y procesos similares es reemplazado por el proceso de fijación y otras fuentes de nitrógeno.

La interferencia antropogénica en el ciclo del nitrógeno, puede no obstante, hacer que haya menos nitrógeno en el ciclo, o que se produzca una sobrecarga en el sistema. Por ejemplo, los cultivos intensivos, su cosecha y la tala de bosques han causado un descenso del contenido de N en el suelo (algunas de las pérdidas en los territorios agrícolas sólo pueden restituirse por medio de

fertilizantes nitrogenados artificiales, que suponen un gran gasto energético (Uri *et al.*, 2008). Por otra parte, la lixiviación del N de las tierras de cultivo demasiado fertilizadas, la tala indiscriminada de bosques, los residuos animales y las aguas residuales han añadido demasiado nitrógeno a los ecosistemas acuáticos (Castro *et al.*, 2006; Vernimmen *et al.*, 2007).

El N ocupa una posición excepcional como elemento esencial para el crecimiento de las plantas por las altas tasas que requieren las plantas superiores. Una deficiencia de nitrógeno en las plantas provoca amarillamiento de las hojas y reducido crecimiento. Los nitratos son la principal forma nitrogenada absorbida por la mayoría de los cultivos. El amonio mineralizado, tiene un corto periodo de vida en el suelo, una parte de los iones son temporalmente absorbidos a la superficie de las arcillas cargadas negativamente o a las partículas orgánicas, otros son usados directamente por las plantas eventualmente la mayoría de los iones amonio son oxidados (Van der Stelt *et al.*, 2007).

En suelos ácidos se presentan bajas tasas de mineralización de la materia orgánica del suelo, ya que contiene aproximadamente 5% por peso de nitrógeno y solo el 2 a 5% del total es liberado anualmente por descomposición, en forma de amonio. Este proceso es más rápido en suelos cálidos bien aireados y húmedos (Vernimmen *et al.*, 2007).

La concentración de nitrógeno en tejido vegetal esta normalmente en el intervalo de 0.5 a 5% de peso total de la materia seca, dependiendo de la especie de planta, tipo de tejido y disponibilidad. Las reservas en el suelo, son con pocas excepciones enormes, comparadas con la actividad contenida en la biomasa viva. Sin embargo la liberación por mineralización puede ser muy lenta y su disponibilidad para las nuevas plantas puede estar limitada por factores que afectan la movilidad por

competencia intra o interespecífica o por desnitrificación. Así el nitrógeno disponible puede ser el principal limitante de la productividad de las plantas (Cruz, 2006).

Las principales formas de nitrógeno que las plantas absorben son los iones nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+). En la mayoría de los suelos el nitrato es la forma más abundante, sin embargo en suelos ácidos el amonio es el ion predominante, debido a que la nitrificación está fuertemente limitada. La mayoría de las plantas, excepto las adaptadas a suelos ácidos crecen muy bien cuando son abastecidas con nitratos (Aciego y Brookes, 2008).

El alto costo de los fertilizantes y el impacto que pueden producir en el ambiente han motivado un interés creciente en diseñar nuevos materiales fertilizantes con características fisicoquímicas que logren una mayor eficiencia de recuperación por el cultivo. La eficiencia de recuperación de los nutrientes depende de la forma química y cantidades que se aplican y de la capacidad fisiológica de los cultivos. De acuerdo con Mortvet (1994) y Baligar *et al.*, 2001, (citados por Castro *et al.*, 2006) la recuperación del nitrógeno de los fertilizantes por el cultivo es de aproximadamente de 50%, la de los fosfatados es menor de 10% y los potásicos cerca de 40%, mientras que para los micronutrientes es de 5 a 10% en la agricultura convencional, representando en todos estos casos pérdidas económicas y daños potenciales al ambiente. Estudios en Guanajuato, México, reflejan que el N aplicado se distribuye en las siguientes rutas: cerca de $20 \pm 8\%$ del N es absorbido por la planta, $32 \pm 13\%$ es retenido en el suelo, $20 \pm 10\%$ se lixivia en forma de nitratos, $8 \pm 13\%$ se pierde como amoníaco por volatilización, y $20 \pm 5\%$ como óxidos de N debido a la desnitrificación (Quiñones *et al.*, 2007).

En sistemas agrícolas, el excesivo uso de fertilizantes nitrogenados puede dar lugar a la dislocación NO_3^- a capas más profundas del suelo que puedan terminar eventual en la agua subterránea (Quiñones *et al.*, 2007).

2.2 ACTIVIDAD ENZIMÁTICA

La actividad enzimática es un sensor de la degradación del suelo ya que ofrece información acerca de las condiciones físicas y químicas del suelo (Sardans y Peñuelas, 2005) y son usadas como sensores en estudios de tratamiento de la fertilidad del suelo (Chen *et al.*, 2003, citados por Sardans y Peñuelas 2005; Roldán *et al.*, 2005).

Las enzimas son biocatalizadores de naturaleza proteica. Todas las reacciones químicas del metabolismo celular se realizan gracias a la acción de catalizadores o enzimas. Poseen un elevado grado de especificidad con respecto a sus sustratos, aceleran reacciones químicas específicas y funcionan en soluciones acuosas en condiciones muy suaves de temperatura y pH (Bünemann, 2008).

La temperatura para la desnaturalización es más alta para las enzimas hidrolíticas del suelo, que para las enzimas en la solución, se atribuye al hecho que las enzimas del suelo son protegidas generalmente por los coloides del suelo como los ácidos húmicos y la arcilla que les dan mayor estabilidad (Skujins, 1978; Burns, 1982 citados por Trasar *et al.*, 2007).

Los procesos por los cuales la fase orgánica del suelo se transforma en sustancias minerales simples, son catalizados por enzimas que son secretadas por las raíces de las plantas, algunos microorganismos y la misma fauna del suelo.

Estos compuestos se caracterizan por:

1. Su actividad se realiza con concentraciones extremadamente pequeñas de sustrato, aunque la cantidad transformada (producto) en la reacción es mucho mayor.
2. Su actividad queda restringida a un margen de pH, temperatura y concentración.
3. Su poder catalítico, conduce a la reacción en dirección al equilibrio en muy poco tiempo.
4. Esta acción catalizadora resulta ser específica de cada enzima.
5. La interacción enzima-sustrato forma un complejo E-S antes de la descomposición del sustrato.
6. Su presencia o ausencia se debe a inhibidores o activadores (Devlin y Witham 1983, citado por Granados, 2003).

2.3 UREASA DEL SUELO

Entre las diferentes enzimas que existen en el suelo están las amidohidrolasas, cuya función hidrolítica está relacionada con compuestos orgánicos de nitrógeno tanto nativo como el adicionado al suelo. Entre las amidohidrolasas, las más importantes son la L-asparanginasa, L-glutaminasa (EC 3.5.1.2), amidasa (EC3.5.1.4) y ureasa (EC 3.5.1.5) las cuales catalizan la hidrólisis de la urea a CO₂ y NH₃ (Tabatabai, 1994, Follmer, 2008).

La importancia de esta reacción, se deriva del hecho de que la urea es una de las fuentes nitrogenadas más utilizadas. Su actividad es muy importante en los residuos de cosecha y en la parte superficial de los suelos. Al igual que en otros sistemas vivos, la velocidad de la reacción catalizada por una enzima es dependiente del pH, de la fuerza iónica, temperatura y presencia o ausencia de inhibidores (Sirko y Brodzik, 2000).

La principal función de esta enzima es actuar sobre enlaces C-N (Figura 2) en enlaces no peptídico y en amidas lineales, rompiendo en secuencias de dos dicho enlace, donde el carbamato es el compuesto intermedio en la reacción, de manera que éste es el sustrato obligado para el segundo paso de la reacción hidrolítica total (Tabatabai, 1994; Pascual *et al.*, 2002).

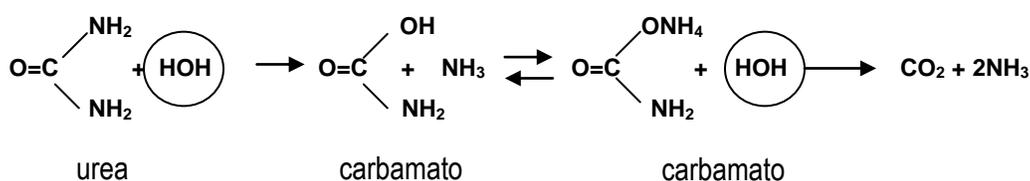


Figura 2. Reacción de hidrólisis de la urea

Siguiendo el patrón de distribución de la materia orgánica (MO) del suelo, la mayor actividad ureasa se concentra en el estrato superficial y se reduce con la profundidad afectando las propiedades físicas y químicas del suelo (Venkatesan y Senthurpandian, 2006).

El nitrógeno se acumula en los suelos en forma de residuos vegetales y animales (Figura 3), y sobre cada lugar se establece una especie de equilibrio entre la tasa de acumulación y de descomposición en periodos largos. La cantidad de materia orgánica y de nitrógeno en el suelo depende de factores climáticos y edáficos así como de las perturbaciones naturales y humanas que influyen (Pritchett, 1991).

- (vi) Enzimas fijadas a restos de células muertas.
- (vii) Enzimas que salen de las células intactas o liberadas por lisis celular.
- (viii) Enzimas temporalmente en el complejo enzima sustrato.
- (ix) Enzimas adsorbidas por la superficie de los minerales arcillosos.
- (x) Enzimas en los complejos arcilla -enzima y humus- enzima

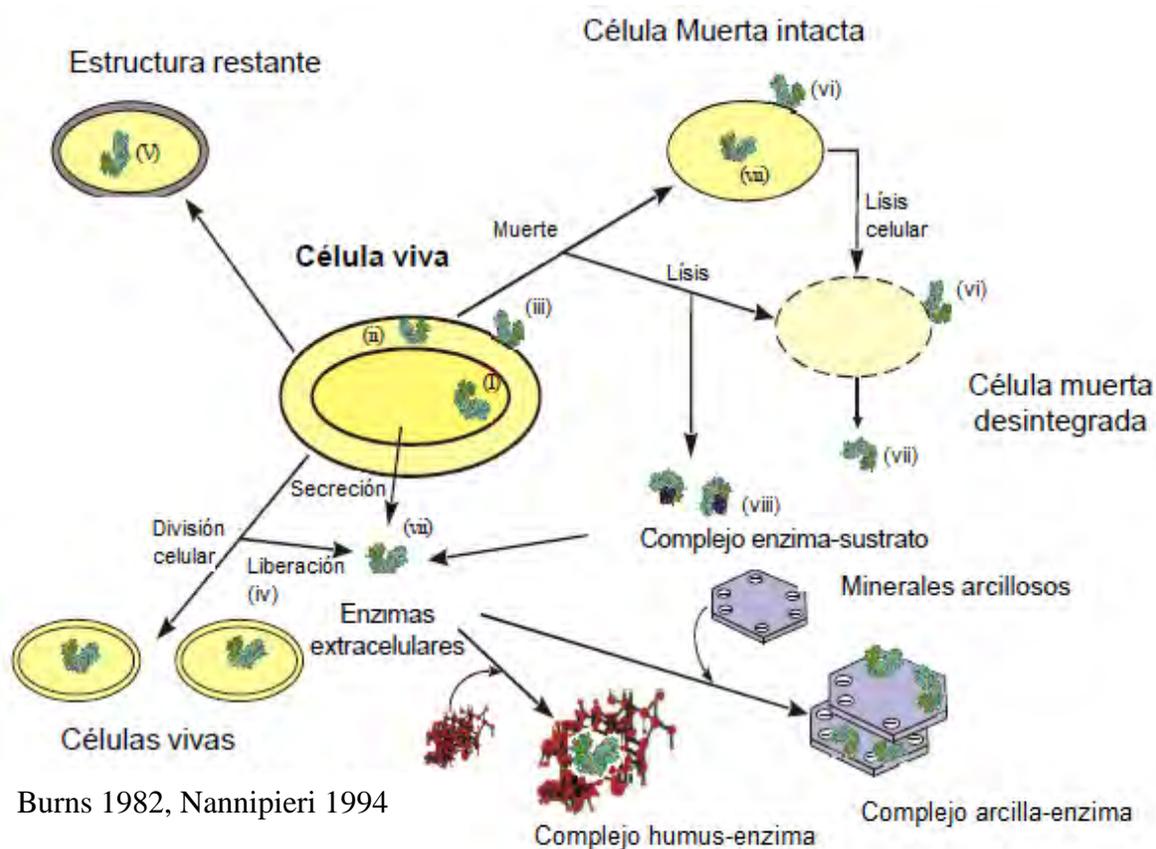


Figura 4. Localización de enzimas del suelo

2.4 REACCIÓN DE LA UREA EN EL SUELO Y PROCESO DE VOLATILIZACIÓN.

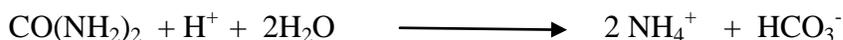
La ureasa es una enzima que participa en el proceso de hidrólisis de la urea, a través de la siguiente reacción (Paul y Clark, 1989):



La importancia de esta reacción, desde el punto de vista agronómico, es derivada del hecho de que la urea es una de las fuentes nitrogenadas más utilizadas.

En tal sentido Bremner (1996) señala que la adición de materiales que incrementen la actividad de la ureasa puede llegar a crear problemas de fitotoxicidad, como consecuencia de la liberación de NH_3 durante la reacción de hidrólisis.

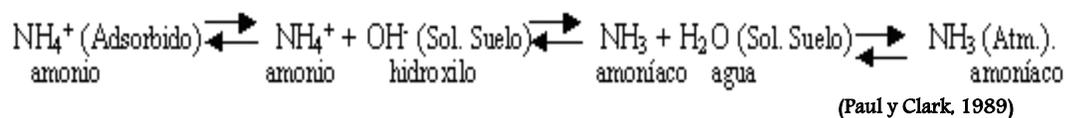
En suelos con pH mayor que 6.3, cuando se agrega urea al suelo, ésta sufre un proceso de hidrólisis, generando como productos de la reacción amonio (NH_4^+) y anión bicarbonato (HCO_3^-),



Si el pH es menor que 6.2, la hidrólisis de la urea es la siguiente:



El amonio liberado en la hidrólisis de la urea queda en equilibrio dinámico con el amoníaco de la atmósfera:



La hidrólisis genera un incremento significativo del pH alrededor del gránulo de urea ya que consume protones. Ese incremento del pH desplaza el equilibrio del amonio a amoníaco favoreciendo la volatilización del NH_3 a la atmósfera.

2.5 EL SUELO

Es uno de los recursos naturales más importantes para cualquier país, ya que de sus condiciones depende el buen estado de los hábitat naturales, las actividades agrícolas, ganaderas y forestales y hasta urbanas (SEMARNAT, 2000). Por el tiempo que toma su formación se le puede considerar un recurso natural no renovable en la escala del tiempo (Doran y Parkin, 1994).

Los cambios del ambiente físico-químico, producto de las actividades humanas, afectan directamente el hábitat edáfico, como consecuencia los suelos sufren procesos de degradación en mayor o menor escala y que puede interpretarse como una pérdida significativa de calidad (Monokrousos *et al.*, 2006).

Hay un continuo intercambio de moléculas e iones entre las fases sólido, líquido y gaseosa que está mediado por procesos químicos físicos y biológicos. Es importante señalar que el suelo es un cuerpo natural dinámico que cumple con funciones primordiales, entre las que están las de mantener la productividad de las especies vegetales, biodiversidad, calidad del aire y del agua así como la salud humana y el hábitat (Etchevers *et al.*, 2000).

2.6 FUNCIONES DEL SUELO.

Hoy se reconoce que el suelo cumple funciones vitales para el ecosistema:

- ❖ Proporciona un ambiente físico, químico y biológico para los organismos vivos
- ❖ Regula el flujo de agua, almacena y recicla nutrientes y otros elementos.
- ❖ Contribuye y apoya la actividad biológica, el crecimiento y diversidad de plantas y la productividad animal.
- ❖ Filtra, degrada e inmoviliza sustancias tóxicas orgánicas e inorgánicas
- ❖ Provee el soporte mecánico a los organismos (Nortcliff, 2002, USDA, 2006, Bastida *et al.*, 2006).

2.7 CONCEPTO DE SUELO.

El suelo es un recurso natural, dinámico y no renovable, cuya condición y funcionamiento es vital para la producción de alimentos, y para el mantenimiento de la calidad ambiental local, regional y global (Doran y Parkin, 1994). La formación del suelo requiere la combinación de los efectos de todos los factores que intervienen en su formación se da en términos del tiempo geológico (FitzPatrick, 1985).

El suelo es vital para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres que se forma a una tasa de 1 cm por cada 100 a 400 años por interacción del clima, topografía, biota y material parental; por lo que se considera a éste como un recurso no renovable en la escala humana de tiempo (Doran y Parkin, 1994).

2.8 CALIDAD DEL SUELO.

Esta es una cualidad inherente de cada suelo independientemente de la edad y origen del mismo, (Doran y Parkin, 1994, Shukla *et al.*, 2006) definen a la calidad de un suelo como "su capacidad para funcionar dentro de un ecosistema determinado para sostener la productividad biológica, mantener la calidad del ambiente, la vegetación y la fauna" (Fließbach *et al.*, 2007).

La definición de calidad del suelo se basa no solo en el uso de suelo, sino en las funciones que este desempeña dentro de los ecosistemas naturales y agrícolas. La existencia de múltiples definiciones sugieren que el concepto de calidad de suelo continúa evolucionando (Singer y Swing, 2000 citados por Bautista, 2001).

La calidad del suelo se puede establecer de acuerdo con:

- ♦ La capacidad de un suelo para promover la productividad del sistema, sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sustentable).
- ♦ La capacidad del suelo para atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental).

Los indicadores de calidad hasta ahora estudiados son: clase textural, densidad aparente y real, color, pH activo y potencial, conductividad eléctrica, porcentaje de materia orgánica y nitrógeno total; además de la disponibilidad de nutrimentos esenciales, respiración del suelo (como indicador de actividad microbiana) y el estado nutricional de las comunidades de *Pinus* y *Abies* (Schoenholtz *et al.*, 2000).

2.9 INDICADORES DE CALIDAD.

Los indicadores de la calidad del suelo son propiedades físicas, químicas y biológicas, procesos y características que pueden ser utilizadas para monitorear al suelo (Seybold *et al.*, 1997, Shukla *et al.*, 2006, Aparicio y Costa, 2007).

Un indicador edáfico requiere cumplir con algunos de los siguientes criterios:

- Describir procesos que ocurren en el sistema.
- Integrar propiedades y procesos Físicos, químicos y biológicos.
- Ser accesible a muchos usuarios y aplicable a condiciones de campo.
- Reflejar atributos de sustentabilidad.
- Su medición pueda ser reproducible
- Ser aplicable en amplio rango de sistemas y condiciones socioeconómicas, culturales y ser sencillo de entender.
- Centrarse en aspectos prácticos (Moron, 2005, Dale *et al.*, 2008).

Los indicadores pueden considerarse herramientas para la toma de decisiones, dan información sobre aspectos críticos y sus consecuencias. Su objetivo es proteger y mejorar la productividad, la calidad del agua, el aire y el hábitat de organismos vegetales y animales, incluido el hombre (Vergara y Etchevers, 2004).

Para integrar y sintetizar adecuadamente la información obtenida, se recomienda determinar umbrales o valores de referencia para cada indicador, así mismo integrar los resultados de manera conjunta y examinar las relaciones entre indicadores (Maserá *et al.*, 2000, Benintende *et al.*, 2008).

2.9.1 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO

La evaluación de la calidad del suelo es compleja y requiere la consideración de variables físicas, químicas y biológicas (Wander y Bollero, 1999, citados por Monokrousos *et al.*, 2006), desde el diverso comportamiento expuesto de las variables en el cambio de uso del suelo (Bending *et al.*, 2004, citados por Monokrousos *et al.*, 2006). Específicamente, las actividades enzimáticas se han sugerido como buenos indicadores tempranos de cambios en características del suelo debido a su relación a la microflora del suelo, la sencillez de la medida y su respuesta rápida a los cambios en el manejo del suelo (Dick, 1994, citados por Monokrousos *et al.*, 2006).

Para evaluar la calidad del suelo para ello una vez seleccionados los indicadores del suelo es necesario para fines de comparación, establecer valores de referencia, para poder conocer el grado de calidad del suelo (Karlen y Stoot, 1994). Los índices de calidad deben ser capaces de describir de una manera simple y eficiente, el amplio ámbito de calidades del suelo y al mismo tiempo debden permitir comparar una condición específica de calidad con otra, pueden ser diferentes pero el índice debe ser sensible al cambio e indiferente al agente que lo provoca. Este es un campo nuevo, la generación de índices de calidad del suelo, requiere gran cantidad de trabajo en el presente y en el futuro para hacer estos valores comparables, en suelos desarrollados bajo diferentes condiciones o sometidos a diferentes manejos (Seybold *et al.*, 1997; Cotler, 2003).

3.1 CAMBIO DE USO DE SUELO

La modificación del uso del suelo debido a las actividades humanas ha provocado una pérdida generalizada de la biodiversidad mundial, ha desencadenado procesos graves de degradación ambiental (Andrews *et al.*, 2004, Falkengren *et al.*, 2006).

El cambio de uso del suelo, principalmente con la conversión de la vegetación natural a suelos de uso agrícola, puede influenciar en muchos fenómenos naturales y procesos ecológicos, conduciendo a un cambio notable en características del suelo (Campos *et al.*, 2007). El claro de los bosques y su conversión subsecuente en zonas agrícolas priva a los suelos de agua, estabilidad, estructura, almacenaje de nutrientes, así como la vida biológica (Yimer *et al.*, 2007, Iyyemperumal y Shi, 2008).

La deforestación en las zonas tropicales ha sido el cambio de uso del suelo más estudiado durante las últimas décadas, debido a la alta biodiversidad que albergan los bosques tropicales y al relevante papel que desempeñan en el balance ecológico mundial (Lambin *et al.* 2003). Sin embargo, la magnitud y la naturaleza del proceso no se han comprendido cabalmente. Este es un tema de particular importancia en México, pues la deforestación que se registra en su porción tropical es de magnitud varias veces mayor a las que se presenta en el resto del país. El Inventario Nacional Forestal 2000 estimó para el periodo de 1976 a 2000 una tasa de deforestación a nivel nacional de 0.25 % mientras que para el trópico, esta se elevó a 0.76 % (Velázquez *et al.* 2002). Sin embargo, los estudios regionales han registrado tasas que se ubican en un intervalo de 4.3 % a 12.4 % anuales (Barton *et al.*, 2004).

El proceso de la urbanización aumenta la heterogeneidad espacial de los suelos recientemente alterados o modificados en la proximidad cercana (Craul, 1992; Schleuss *et al.*, 1998 citados por Green y Oleksyszyn, 2002).

Por ello se alteran las propiedades físicas de suelos incluyendo la estructura, compactación, aireación, drenaje y un régimen de la temperatura (Green y Oleksyszyn, 2002).

3.2 Crecimiento de la frontera agropecuaria

La conversión de terrenos hacia usos agropecuarios es una de las causas más importantes de deforestación en América Latina (FAO, 2007). La superficie cultivada en México en 2000 fue de 20.2 millones de hectáreas. No obstante, el IFN 2001 reportó en ese mismo año que 32.8 millones de hectáreas se encontraban bajo uso agrícola, es decir, hubo 12.6 millones de hectáreas abiertas a la agricultura que, sin embargo, no se ocuparon en ese momento. Parte de esta superficie pudo estar en un breve descanso, o bien fue abandonada tiempo atrás pero sin que se haya desarrollado vegetación secundaria. El constante desmonte es, sobre todo, una forma de salvaguardar la posesión del terreno. Al limpiar su parcela el productor conserva su derecho al uso del predio, que de otro modo le sería retirado bajo el argumento de que la tierra está ociosa. De tal suerte, un número indeterminado de hectáreas permanecen desprovistas de vegetación secundaria gracias al chapeo, roza o quema periódicos, fomentándose además la degradación del suelo (Márquez, 2004).

La frontera agrícola ha avanzado a una tasa elevada en los últimos años. Entre 1993 y 2000 la superficie cultivada se incrementó en 2.57 millones de hectáreas, cifra menor en cerca de 24,000 hectáreas al crecimiento de la superficie total dedicada a la agricultura registrada en los inventarios nacionales de uso del suelo. Esto último significa que parte del crecimiento de la producción agrícola en México se ha desarrollado a costa de la vegetación natural, pero también que el crecimiento de la agricultura ha sido más veloz (1.8% anual) sobre terrenos que ya habían sido desmontados previamente que sobre la vegetación silvestre (1.2% anual) (Velázquez *et al.*, 2002).

En el ámbito pecuario se ha observado una reducción importante en el número de cabezas de ganado durante las últimas dos décadas. En 1980 se registraron 50.7 millones de cabezas y 43.3 millones en 1999 (-0.8% anual en promedio). El descenso fue más marcado en el ganado mayor, cuyo número cayó a una tasa de -1.0% anual, comparado con el número de ovejas y cabras, que apenas se redujo a una tasa de -0.3% anual. A pesar de ello, la superficie destinada a ganadería (medida como pastizales naturales e inducidos) creció casi cuatro millones de hectáreas en el periodo de 1993 a 2000 (1.94% anual).

3.3 SUELOS FORESTALES.

Los suelos forestales se caracterizan por la cubierta forestal y su capa superficial resultante que determina las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo, dichas propiedades son muy distintas a las de otros suelos; las propiedades de un suelo forestal están asociadas a un microclima, al reciclaje de los elementos, a una población microbiana específica y a la formación de ácidos orgánicos provenientes de la descomposición de la materia orgánica. En ellos se llevan a cabo procesos dinámicos como los ciclos de nutrimentos (Pritchett, 1991).

El estado nutricional de una especie se puede relacionar con estadios de deficiencia y suficiencia de los nutrimentos esenciales, ya que las plantas construyen su organismo con determinados elementos químicos que se encuentran en el medio que las rodea, aproximadamente de 95 a 98% de la planta está constituida por H, C, O y N y de 2 a 5% corresponden a otros elementos (Quiroz, 2002).

Los elementos nutrimentales no sólo deben estar presentes en las formas que la planta puede utilizar, sino también debe de existir entre ellos un equilibrio aproximado de acuerdo con las cantidades que necesiten las plantas. Si falta alguno de éstos o se encuentra presente en proporciones inadecuadas, las plantas no tendrán un crecimiento normal. Entonces, los elementos requeridos por la planta para un desarrollo óptimo son los elementos esenciales.

3.3.1 Los bosques templados de México

La condición de México, como país megadiverso, es ampliamente conocida en el mundo. Dicha diversidad es debida a su historia biogeográfica, a la topografía, todo ello ha creado un intricado mosaico de ambientes, que han generado la enorme gama de especies. Aunque cabe aclarar que su alta diversidad biológica suele asociarse de manera importante con las selvas tropicales, los ecosistemas de regiones templadas contribuyen significativamente en la conformación de la diversidad biológica del país (Challenger, 2003). Dada la ubicación de México, dentro de los trópicos y algo distante de las zonas del planeta dominadas por ecosistemas templados, la presencia de estos en el país se relaciona con el efecto de la altitud y con su vínculo al clima. A mayor altitud la temperatura baja, incluso hasta permitir zonas de nieve perpetúa en las cimas de las montañas más altas, por lo que los ecosistemas templados de México se asocian estrechamente con las zonas montañosas (Tamayo, 1990).

La presencia, distribución y variabilidad de los ecosistemas templados en las sierras y serranías del país no sólo depende de la existencia misma de éstas, sino de otros factores como son la abundancia y la estacionalidad de la lluvia, el tipo de suelo, la orientación de la ladera con respecto al sol y la historia biogeográfica de la zona, entre otros (Challenger, 1998).

La distribución de los ecosistemas templados de México está definida por los tipos de clima Cf, Cw, Cx y Cs del sistema de Köppen, que fue modificado por García (1973) para adecuarlo a las condiciones especiales de México, y que son propios de las zonas montañosas (Figura 5).

Los ecosistemas que se desarrollan bajo estas condiciones climáticas son de varios tipos, pero debido a sus afinidades florísticas y en general a sus semejanzas ecológicas compartidas, se pueden agrupar en dos grandes conjuntos o “zonas ecológicas” el bosque mesófilo de montaña (cuya distribución se asocia con el tipo de clima Cf, aunque no está restringido a éste), y el bosque de coníferas y encinos (o bosque de pino-encino), que se asocia especialmente con el tipo de clima Cw, aunque puede desarrollarse también en climas de tipo Cs y Cx.



Figura 5. Distribución de los climas templados en México (Challenger, 2003)

Los bosques de México tienen enorme valor ambiental, social y económico. México en 1994 se reportaba que existían en el país 55.3 millones de bosques, fundamentalmente bosques templados ubicados en las sierras que atraviesan el país de norte a sur, y selvas tropicales húmedas y secas, ubicadas en los estados del sur y de la península de Yucatán. Entre las características más sobresalientes de los ecosistemas forestales del país se encuentran su diversidad y productividad biológicas: en ellos está contenida el 10% de la biodiversidad del mundo, incluyendo un alto número

de especies endémicas. Los bosques templados de México, son dentro de su tipo los de mayor riqueza biológica en el mundo, en ellos habitan 55 especies de pinos (endémicas en un 85%) y 185 de encinos (con un 70% de endemismo). Estos bosques ofrecen condiciones de hábitat temporal o permanente de numerosas especies animales, entre las que se encuentran importantes grupos de aves e insectos migratorios. Como en el caso de los bosques de otras latitudes, las áreas forestales del país cumplen funciones básicas de regulación ambiental que hacen viable la presencia y actividades tanto de las sociedades rurales como de las urbanas.

Hoy en día, los pinos dominan grandes extensiones de Norteamérica y Eurasia. Junto con otros árboles como los oyameles (*Abies* sp.), encinos (*Quercus* sp.) y cipreses (*Cupressus* sp.) forman los llamados bosques de coníferas. Se calcula que estos bosques cubren alrededor del 34% de la superficie del país, ocupando el segundo lugar en cuanto a la superficie que abarcan entre las zonas ecológicas del país. Los bosques de pino y encino son los ecosistemas más ricos en especies (en conjunto) que cualquier otro ecosistema de México (Challenger, 1998; Romeu, 1995).

Debido a su clima benéfico, tanto para la comunidad y bienestar humanos como para la producción agrícola, estos bosques se han visto afectados, pues los suelos en que prosperan se han usado para otros fines como la agricultura, ganadería y asentamientos humanos; además de que los incendios, las plagas y las talas indiscriminadas han acabado con muchos de ellos (Romeu, 1995, Farjon, 1997).

3.3.2 Actividades humanas en los bosques templados

Desde los comienzos de las actividades agrícolas y del establecimiento de poblaciones sedentarias en México, los bosques de coníferas y encinos se cuentan entre los ecosistemas más afectados por los asentamientos y por las actividades de producción primaria (agricultura y forestal), debido a la fertilidad de sus suelos, el clima agradable con estaciones marcadas (el frío y la temporada seca ayudan a reducir las plagas y enfermedades), y la buena calidad maderable de sus bosques, entre otros factores. Debido a ello, desde hace mucho tiempo estos ecosistemas han sufrido diversos tipos de transformaciones, lo que ha repercutido en su degradación y eliminación en muy vastas extensiones (Challenger, 2003).

A pesar de que el origen de la transformación de estos bosques se remonta a tiempos prehispánicos, con la conquista y la llegada de los europeos, las presiones directas de la población y de uso del suelo se intensificaron más que en cualquier otro tipo de ecosistema. Los españoles fundaron sus asentamientos coloniales y sus haciendas de manera preferencial en las zonas templadas de México, lo que implicó una afectación mayor a los bosques de coníferas y encinos, al ser deforestados para el establecimiento de campos de trigo, para la construcción de casas, para el pastoreo de ganado, etcétera.

3. Justificación.

Con base en los análisis de las propiedades físicas, químicas, bioquímicas y biológicas de los suelos de los Parques Nacionales Zoquiapan y Anexas e Izta-Popo y el Área Natural Cumbres, se busca contribuir al conocimiento del contenido de sus elementos esenciales, la calidad y su entorno natural.

Así mismo; como se sabe, la distribución de la población humana a lo largo de su historia se ha dado principalmente en las zonas donde existen los recursos naturales necesarios para su desarrollo sociocultural, dependiendo del manejo que se les da, la calidad natural de dichos recursos se deteriora y el desarrollo de la población puede llegar a su declinación.

Es por ello que el presente trabajo busca saber cuánto hay y cómo están distribuidos los nutrientes del suelo, especialmente N en los suelos forestales de las zonas de estudio propuestas y con qué tipos de vegetación o uso; por ejemplo, tienen mayor relación. Todo ello con el fin de proponer alternativas de uso para beneficio de las poblaciones que se favorecen directa e indirectamente de los ecosistemas presentes en estas áreas foresta

3.1 SUPUESTOS

Las enzimas son proteínas cuyo papel es catalizar las reacciones químicas en los sistemas vivos, actúan sobre sustratos específicos transformándolos en productos necesarios para los ciclos biológicos, son liberadas por microorganismos por lisis celular después de su muerte y por las plantas mediante secreción al suelo. Un bajo porcentaje de estas proteínas-enzimas quedan inmovilizadas y estabilizadas (sin perder su capacidad de hidrólisis) en interacción con los diferentes componentes de la fase coloidal del suelo, como las arcillas, moléculas orgánicas y complejos organominerales, por lo que en el suelo, al igual que en los seres vivos, la velocidad de la reacción catalizada por las enzimas es dependiente de la concentración de su sustrato, del pH, fuerza iónica, temperatura y la presencia o ausencia de inhibidores.

Con base en los conocimientos comprobados, que se establecen en los supuestos anteriores, se plantea la siguiente:

4. HIPÓTESIS

La actividad de la ureasa, por su contribución a la liberación de N, es un buen indicador de la fertilidad y calidad del suelo lo que disminuye con la pérdida de MOS, nutrientes y alteraciones en el pH ante la disminución de la cobertura vegetal por cambio en el uso del suelo.

5. OBJETIVOS.

Evaluar la contribución de la actividad ureasa en la liberación de N en suelos de uso agrícola y forestal y como indicador de impacto por cambio de uso del suelo

PARTICULARES

1. Evaluar la actividad de la ureasa en suelos con uso forestal y agrícola que compartan características climáticas semejantes, precipitación y temperatura.
2. Evaluar la actividad ureasa como indicador de impacto por cambio de uso del suelo
3. Seleccionar los parámetros físicos, químicos, biológicos y bioquímicos del suelo que sirvan como indicadores de su calidad.

6. MATERIALES Y MÉTODOS.

6.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO.

6.2 PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL POPOCATÉPETL (PNIP)

El Parque Nacional Izta-Popo cuenta con una superficie de 25679 ha (Figura 7), se ubica en los municipios de Amecameca, Atlautla, Ecatzingo en el Estado de México, Tlahuapan, San Salvador el Verde, Domingo Arenas, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco, en Puebla y Tetela del Volcán en Morelos (figura 7), las coordenadas son 18° 54.6' 19° 42' Lat N y 98° 31.2' 98° 48' Long W, forma parte del Eje Neovolcánico Transmexicano. La topografía comprende a los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, con alturas de 5280 y 5482 m respectivamente (Figura 6).



Figura 6. Panorámica del Parque Nacional Izta-Popo

El clima es variado: templado subhúmedo, templado húmedo, frío y muy frío, presentando lluvias en verano. Para el clima templado subhúmedo la temperatura media anual es de 16°C con una precipitación anual de 746 mm. En el clima templado húmedo la temperatura media anual es de 16.1°C, con una precipitación media anual de 659.3 mm a 1885 mm. En los lugares donde predomina el clima frío y muy frío, la temperatura media anual va de los -2 a los 5°C, con precipitaciones anuales de 1186 mm (CONANP, 2007).

La vegetación está representada por los géneros *Pinus* y *Abies*. El género *Pinus* se encuentra a lo largo de todo el gradiente altitudinal, mientras que el *Abies* es de localización más restringida, predominantemente entre los 3000 y 3500 m.

Según la carta edafológica E14-B41, escala 1: 50000, de INEGI los tipos de suelo son:

Andosol: suelos de color oscuro, característicos de los afloramientos de cenizas volcánicas y formados por complejos alofano-humus. Son suelos ligeros con altos porcentajes de materia orgánica (MOS), buen contenido de nutrientes, pueden formar Andosoles húmicos.

Leptosol (Regosol): llamados suelos poco evolucionados, pobres en MOS característicos de las pendientes donde la erosión ha tenido actividad intensa, en general la MOS se incorpora en forma de complejos húmico-arcillosos con el material mineral.

Phaeozem: llamados suelos isohúmicos empardecidos. Este suelo representa la transición entre los suelos isohúmicos (con perfil AC) y los suelos empardecidos, cuyo horizonte humífero A1 está menos desarrollado que el horizonte B su formación vegetal característica es la pradera, que está bien representada en América del Norte.

Cambisol: también conocidos como suelos pardos templados, son suelos empardecidos, caracterizados por la ausencia de lavado de arcilla y de hierro, con horizontes A y B bien definidos, pobres en contenido de nutrientes; presentan potencial para el desarrollo forestal con adecuadas prácticas de manejo (Duchaufour y Souchier, 1984).

6.3 PARQUE NACIONAL ZOQUIAPAN Y ANEXAS (PNZA)

Se ubica en la porción Norte de la Sierra Nevada, conocida como los Montes de Río Frio, en los municipios de Texcoco, Tlalmanalco, Ixtapaluca y Chalco en el Estado de México y Tlahuapan en Puebla (Figura 7). Cuenta con una superficie de 19418 ha. Se localiza entre 19° 15' y 19° 26' Latitud N y 99°56' Longitud W. Hacia la parte norte del Iztaccíhuatl, las elevaciones más notables son el Tláloc (4120 m), el Yoloxóchitl (3900 m), el Telapón (4060 m) y el Papayo (3600 m). Es factible la práctica de actividades de excursionismo, observación de flora y fauna, montañismo y senderismo.

La conformación geológica de la Sierra Nevada se dio a partir de emisiones de lava que emergieron a través de calizas plegadas que afloran en la parte baja al sur del Popocatepetl; las emisiones fueron sucesivamente de dacitas que forman los picos de la parte central de la Sierra: Tláloc y Telapón; andesitas que conforman el Iztaccíhuatl y el Popocatepetl; y grandes cantidades de basaltos arrojados por pequeños conos de formación reciente. El material litológico está formado por andesitas, dacitas, arenas y cenizas volcánicas. Las unidades de suelo presentes son Leptosoles, Regosoles, Andosoles, Cambisoles y Fluvisoles.

La hidrología está representada por cuatro ríos: Amecameca, Molinos, Akal, Atila y escurrimientos perennes menores. La variedad de clima abarca desde un clima de tipo templado húmedo hasta un clima frío a muy frío. La vegetación predominante la integran los bosques de coníferas y encinos, los cuales juegan un papel esencial en relación con el ciclo hidrológico, la formación y conservación de suelos y la biodiversidad. Entre los 2500 y 3500 m, se encuentra bosque de *Abies religiosa* acompañado en ocasiones por *P. ayacahuite*, *Alnus jorullensis*, *Quercus laurina*, *Salix oxylepis*, y *Cupressus lindleyi*. Arriba de los 4000 m se encuentra pastizal alpino de gramíneas amacolladas tales como: *Muhlenbergia macroura*, *M. quadridentata*, *Festuca toluensis*, *F. Amplissima* y *Calamagrostis toluensis*. En el estrato rasante, algunas especies de musgos.

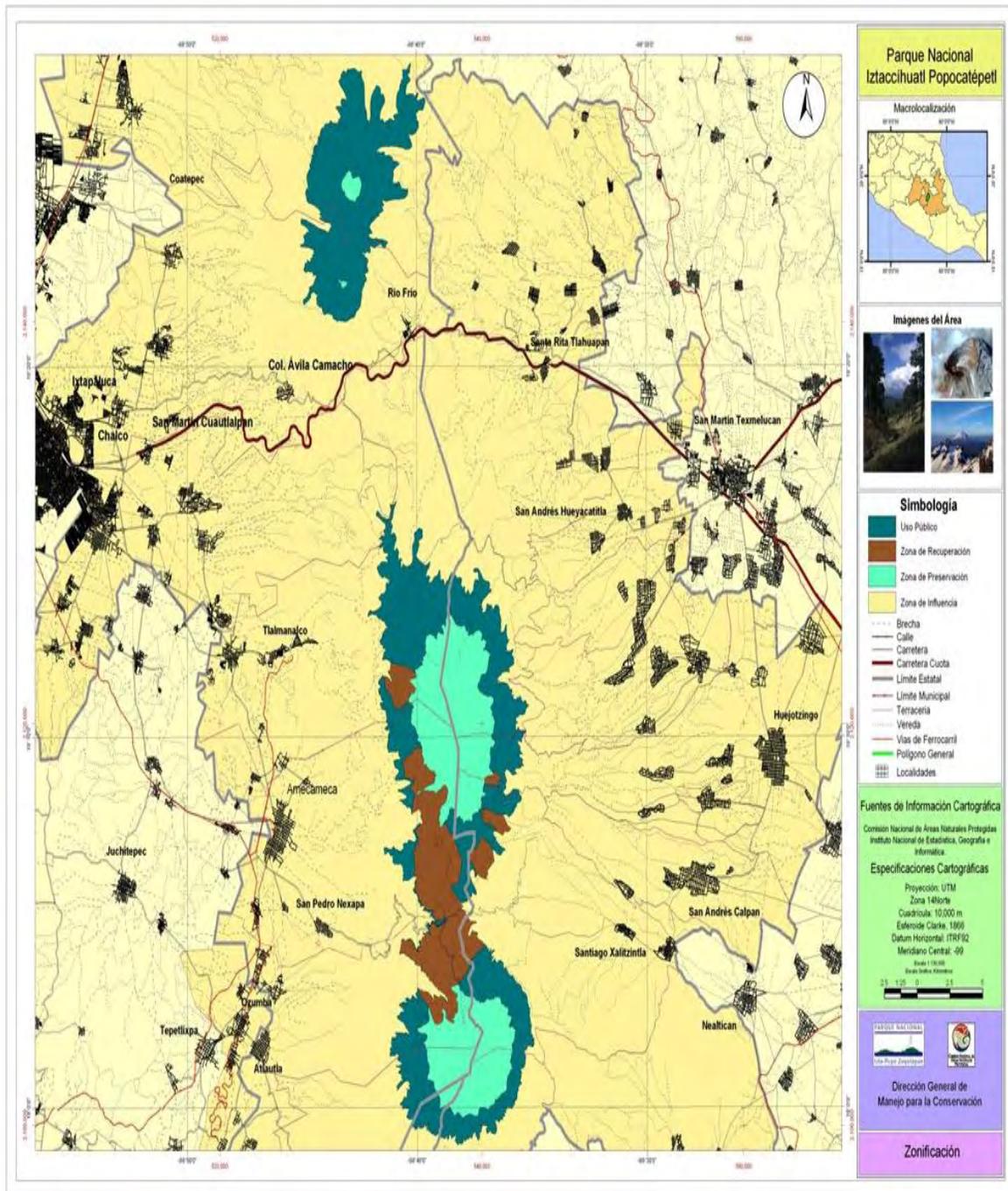


Figura 7. Localización geográfica del Parque Nacional Iztac-Popo y el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas

6.4 Área Natural “Mil Cumbres” (ANMC)

Se localiza entre los estados de México y Michoacán (Figura 8). Sus coordenadas geográficas son: 19° 59' 42" y 19° 57' 07" latitud N y 100° 09' 54"; y 100° 06' 39" longitud W y para el corredor Chincua-Cerro Pelón son 19° 44' 27" y 19° 18' 32" latitud N y 100° 22' 26" y 100° 09' 07" longitud W. Tiene una extensión de 56259 ha, divididas en 3 zonas núcleo y 2 zonas de amortiguamiento.

El área pertenece a la Provincia Fisiográfica del Eje Volcánico Transmexicano. La altitud, varía de los 2400 a 3600 m. La región presenta en general un clima Cw, templado subhúmedo con lluvias en verano, temperaturas medias anuales de 8° a 22° C, precipitaciones promedio desde 700 mm hasta 1250 mm y temperaturas mínimas para el mes más frío de entre -3° y 18° C. La composición litológica de la zona incluye andesitas, basaltos, riolitas, granitos, esquistos y tobas, lo que determina la presencia predominante de Andosoles, húmico y en menor extensión Acrisoles y Planosoles, Feozem, Litosoles, Luvisoles y en menor proporción Cambisol, Regosol y Vertisol .

La vegetación incluye bosque de *Abies*, este se distribuye desde los 2400 hasta 3600 m, es la comunidad más representativa de la zona núcleo, ocupa importantes extensiones del subsistema montañoso, constituye el hábitat de la mariposa Monarca. En áreas perturbadas, principalmente en laderas, se desarrolla un estrato arbóreo inferior con presencia de los géneros *Quercus*, *Alnus* y *Arbutus spp.* El bosque de pino, se presenta en manchones aislados, la mayor parte de ellos se desarrollan a altitudes entre 1500 y 3000 m. asociados a los sitios más húmedos o en declives fuertes, como es el caso de las cañadas, por debajo de los 2000 m, en el primer caso predomina el *P. pseudostrobus*, en suelos más someros o en condiciones secas se da lugar a asociaciones de *P. rudis* y *P. teocote*, así como *P. oocarpa* y *P. michoacana* en las partes medias y bajas muy empinadas.

El estrato arbustivo y el herbáceo se encuentran representados por los géneros *Juniperus*, *Senecio*, *Eupatorium*, *Stevia* y *Archibaccharis* spp. El estrato rasante está dominado por musgos como *Thuidium* y *Minium* spp. y hongos basidiomicetos en las épocas de lluvias. Entre los hongos se tienen reportados *Amanita muscaria*, *Lactarius sanguiflus*, *Russula brevipes*, *Lycoperdon* spp. *Gomphus* spp. *Ramaria* sp. *Clavariadelphus truncatus*, *Morchella* spp. *Helvella crispa* y *Boletus* sp., algunos de ellos de importancia para las economías domésticas de autoconsumo (INE, 2007, COFOM 2007).



Figura 8. Localización geográfica de las zonas de estudio

6.5 Toma de muestras de suelo

En cada uno de los sitios que se visitaron, se seleccionan las unidades ambientales más representativas de la zona con mínima perturbación debida a trazos de caminos, tala o incendios. En ellas se delimitarán cuadrantes de 50×20 m (0.1 ha) para la toma de muestras compuestas de suelo.

Una buena muestra compuesta deberá: a) contener un volumen semejante de cada una de las submuestras y b) ser el resultado de un buen proceso de homogeneización. Con base en estos criterios en los sitio seleccionados se eligieron al menos cuatro puntos y se recolectaron submuestras de 0 a 10 cm (Figura 8) de profundidad que se homogenizarón para obtener una muestra compuesta para determinar la actividad enzimática en el suelo, esta muestra compuesta, se trasladó en bolsas de plástico con cierre hermético debidamente etiquetadas.

Para caracterizar los suelos se evaluaron sus propiedades físicas y químicas. Para ello en cada sitio se colectaran cuatro submuestras a profundidad de 0 a 20 cm (Figura 9) de aproximadamente 1 kg cada una, las cuales fueron mezcladas y homogenizadas para obtener una muestra compuesta de cada sitio, la cual fue trasladada en bolsas plásticas etiquetadas al laboratorio para su análisis.



Figura 8. Submuestra de suelo 0-10 cm.



Figura 9. Submuestra de suelo 0-20 cm

6.6 Toma de la muestra foliar

Para el análisis foliar y en el caso de ramas que se encontraban a una altura no superior a los cinco metros, estas se recolectaron con tijeras para jardinero y para las ramas ubicadas a mayor altura, las muestras se obtuvieron lanzando una cuerda de 50 m de largo, con un contrapeso de fierro, que jalaba la rama y obtenía la muestra seleccionando preferentemente fascículos foliares de los últimos dos años de la rama en crecimiento.

Se guardaron en bolsas de papel etiquetadas con los siguientes datos: nombre del sitio, fecha, género, especie. Las especies recolectadas se determinaron con las claves de pinos mexicanos (Martínez, 1992). En el laboratorio las muestras se secaron en la estufa marca Felisa a una temperatura de 60°C, hasta que las muestras alcanzaron el peso constante, se molieron y tamizaron en molino marca Thomas Scientific, con malla del # 20, finalmente se guardaron las muestras en frascos de plástico con los datos: fecha de colecta, localidad, sitio, coordenadas en UTM, especie y género, se procedió a su análisis químico.

En el caso de muestras foliares agrícolas, se realizó la toma de muestras de manera aleatoria en cada parcela, procurando que estas sean de plantas maduras (con frutos). Las partes foliares que se tomaron variaron de acuerdo a la especie cultivada en el sitio de recolecta.

Para el caso maíz (milpa), se tomó la hoja inferior opuesta al jilote, ya que esta refleja mejor el estado nutrimental de la planta. En trigo, avena y en general en los cereales se toma la hoja bandera. La hoja bandera es la que se encuentra en la parte superior de la planta.

6.7 PRETRATAMIENTO DE MUESTRAS

Previo al análisis físico y químico del suelo, la muestra se seca al aire en un lugar libre de contaminantes. Una vez seca, se tamiza con malla de 2 mm de abertura y se envasa en frascos de polietileno. Para la determinación de los parámetros biológicos y bioquímicos se mantiene las muestras en refrigeración a 4°C, con el fin de mantener en condiciones óptimas a las enzimas y reducir al máximo el metabolismo microbiano en la muestra. Para la determinación de actividad enzimática, se procede a un secado y tamizado igual al realizado en las muestras de suelo para su caracterización, a fin de eliminar restos de materia orgánica o raíces y fragmentos minerales gruesos. Las muestras foliares se secan a una temperatura aproximada de 65-70°C, en una estufa, hasta obtener peso constante. Ya seca la muestra, se pasa por un molino y se tamiza en una malla del número 20 para almacenarlas en frascos de polietileno.

6.8 Análisis físico y químico del suelo.

- ❖ (AS-09) Textura: Método de la probeta o Bouyoucos (Bouyoucos, 1963, citado por Palmer y Truoch, 1989).
- ❖ (AS-03) Densidad aparente por el método de la probeta y densidad real por el método del picnómetro (Domínguez y Aguilera 1987).
- ❖ (AS-02) pH Activo o Real. Relación 1:2 con H₂O. Método potenciométrico (Jackson, 1982).
- ❖ (AS-24) pH Potencial. Relación 1:2 con KCl 1N. Método potenciométrico (Jackson, 1982).

- ❖ Conductividad eléctrica de la solución del suelo relación 1:5. Se midió con conductivímetro (Jackson, 1982). Richards, 1990).
- ❖ (AS-07) Materia orgánica. Método de Walkley-Black (Jackson, 1982)
- ❖ (AS-08)N total. Método semimicro-Kjeldahl modificado para incluir nitratos (Bremner, 1965, Jackson 1982).

6.9 Análisis químico de planta

- ❖ Nitrógeno. Método semimicro-Kjeldahl modificado para incluir nitratos (Bremner, 1965, Jackson, 1982)

7.1 Cuantificación de la actividad ureasa

- ❖ Actividad de la enzima ureasa por el método propuesto por Tabatabai, 1994, para lo cual se siguió el siguiente procedimiento:

a) Medida de la reacción enzimática

Colocar 2.5 g de suelo en tubos de ensaye de 70 mL (Figura 10) (Correr para cada suelo, una muestra blanco bajo el mismo procedimiento, sustituyendo con agua, el volumen de solución de urea).

Agregar 0.1 mL de tolueno y 4.5 mL de Buffer THAM, agitar por unos segundos para homogeneizar.

Agregar 0.5 mL de urea 0.2 M, agitar nuevamente para su mezcla.

Tapar e incubar a 37 °C por dos horas. Colocar aproximadamente 15 mL de KCl-Ag₂SO₄, dejar enfriar y aforar a 25 mL de volumen con esta solución. Mezclar nuevamente.



Figura 10. Determinación de la actividad Ureasa

b) Determinación de amonio (N-NH_4^+) por arrastre de vapor

Para determinar N-NH_4^+ en la suspensión 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 H_3BO_3 con mezcla de indicadores.

Destilar aproximadamente 4 minutos o hasta un volumen de 50 mL.

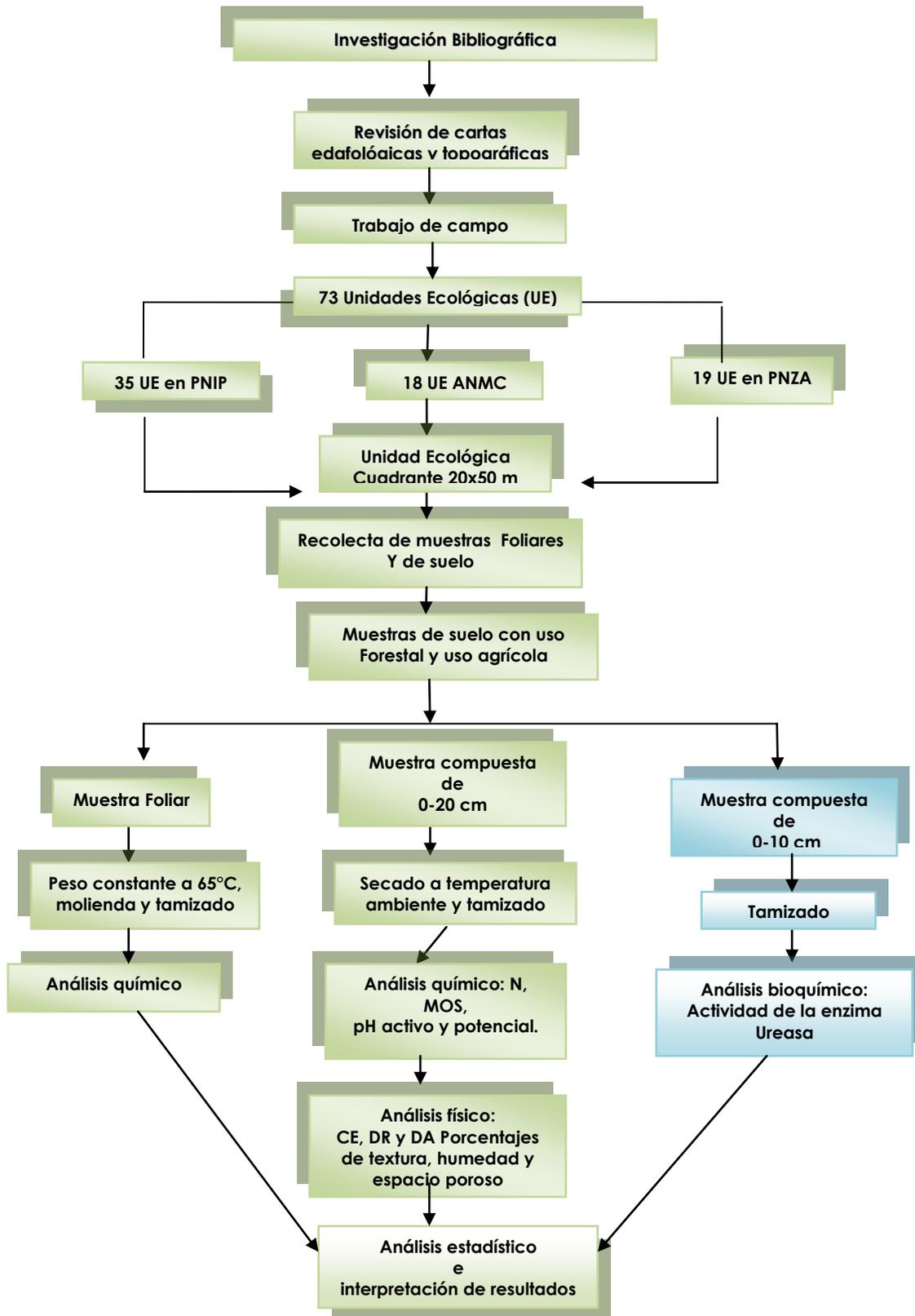
Titular con H_2SO_4 0.0025 N. (Figura 11)

(El método fue propuesto por Tabatabai y Bremner, 1972 citados en Tabatabai, 1994.)



Figura 11. Titulación para determinar la concentración de la actividad enzimática

7.2 Diagrama de Flujo Muestreo, recolecta y análisis de datos, de los sitios de estudio



7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Condiciones fisiográficas de los sitios de estudio

7.1.2 Parque Nacional Zoquiapan y Anexas (PNZA)

En esta Área Natural Protegida se observó la presencia de *Pinus* (Figura 12) *P. pseudostrobus*, *P. teocote*, *P. hartwegii*, *Abies religiosa* y *Quercus* spp en el intervalo altitudinal entre 2897 y 3218 m definiendo 20 unidades ambientales bajo el criterio de homogeneidad en fisiografía, suelo y tipo de vegetación en las que se delimitaron los sitios de muestreo en las comunidades forestales y zonas adyacentes agrícolas con cultivos de Maíz (*Zea mays*) (Figura 13) y Avena (*Avena sativa*) (Cuadro 1). Con respecto a los grupos de suelos asociados se encontraron principalmente Andosol húmico, Cambisol húmico y Leptosol, los cuales sostienen comunidades de *P. sp*, *A. religiosa* y *Cupresus* sp. El grupo de los Cambisoles es de los grupos de suelos mejor representados a lo largo del gradiente y asociados a unidades ecológicas bien definidas, este tipo de suelo se caracteriza por presentar un perfil A₁(B)C, horizonte B de alteración cámbico, formado en condiciones aerobias. Los Leptosoles, son suelos con presencia de roca muy dura a poca profundidad, secuencia de horizontes AR, profundidad menor a 10 cm, pobre en materia orgánica y muy susceptible a la erosión con fuerte pendiente (Cruz, 2006).



Figura 12. Bosque de pino en Zoquiapan, ecosistema típico del Eje Neovolcánico.



Figura 13. Zona agrícola adyacente al bosque

Cuadro 1. Datos de campo de unidades ecológicas del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas

Sitio	US	Latitud	Longitud	Altitud	Vegetación arbórea y/o cultivos presentes
		N	W		
		UTM		m	
Faldas del Tlaloc 1	F	2149216	524894	3068	<i>Abies religiosa</i>
Bosque reforestado	F	2151755	522195	2719	<i>Pinus</i> sp.
Cañada	F	2141222	524685	3218	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp.
Pastizal	F	2141309	522925	2897	<i>Pinus</i> sp.
Zona de cultivo 1	A	----	----	2610	Maíz (<i>Zea mays</i>)
Zona de cultivo 2	A	2141421	521537	2682	Maíz (<i>Zea mays</i>)
Zoquiapan	F	22141045	525220	3341	<i>Pinus teocote</i> , <i>Abies religiosa</i> y <i>Quercus</i> sp.
Faldas del Tlaloc 2	F	2141188	5254719	3261	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp. <i>Alnus</i>
Faldas del Tlaloc 3	F	2141224	524126	3207	<i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Pinus montezumae</i> , reforestación de <i>Pinus</i> sp. <i>Alnus</i>
Zona de cultivo 1	A	2141447	521548	2683	Avena (<i>Avena sativa</i>)
Zona de cultivo 2	A	2141447	521548	2683	Avena (<i>Avena sativa</i>)
Zona de cultivo 3	A	2141537	520724	2226	Avena (<i>Avena sativa</i>) Terreno limitado por Maguey
Zona de cultivo 4	A	2152650	521646	2611	Maíz (<i>Zea mays</i>)
Zona Pecuaria	A	2152182	521754	2676	Alrededor <i>Cupressus</i>
Zona de Reforestación	F	2152084	521776	2680	<i>Pinus montezumae</i> , <i>P. teocote</i> <i>Quercus crasifolia</i> , <i>Bacharis</i> sp
Zona Pecuaria	A	2151552	522792	2774	<i>Pinus montezumae</i> , <i>P. teocote</i> <i>Quercus crasifolia</i> , <i>Bacharis</i> sp.
Bosque	F	2151552	522792	2774	<i>Quercus</i> sp.
Zona de cultivo 5	A	2150549	523555	2947	Avena (<i>Avena sativa</i>)
Bosque	F	2150581	523449	2948	<i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp.

US = uso de suelo A = agrícola F = forestal

7.1.3 Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNIP)

En esta zona se encontraron comunidades de bosques templados, constituidos en asociaciones vegetales de los géneros *Pinus*, *Abies* y *Cupresus*, durante los recorridos se encontraron cultivos de Maíz (*Zea mays*) y Avena (*Avena sativa*) desde 2486 a 3735 m (Cuadro 2), en suelos, Andosol húmico asociados a Leptosol y Regosol eútrico como los más importantes soportan, comunidades de *P. pseudostrodus*, *P. montezumae*, *P. patula*, *P. teocote*, *P. ayacahuite* y *A. religiosa*. Los Regosoles, son los más abundantes a lo largo del gradiente, son suelos delgados sobre material no consolidado, pobres en materia orgánica. Tienen secuencia de horizontes AC, Con respecto a los grupos de suelos asociados a la vegetación arbórea, se encontró que existe una marcada relación entre ellos Andosol húmico (Figura 14), Cambisol húmico y Leptosol, los cuales sostienen a comunidades de *Pinus*, *A. religiosa* y *Cupresus* sp.



Figura 14. Perfil de suelo característico del PNIP (Andosol)

La vegetación natural presente en estos suelos son los bosques de *P. hartwegii* y *P. pseudostrodus*, en asociación con *A. religiosa* y zacatonal subalpino. Los Andosoles se caracterizan por su origen volcánico, perfil AC, sin embargo sobre roca consolidada y a ellos se encontraron asociados principalmente al *P. patula*, *P. teocote*, *P. hartwegii* y *A. religiosa*.

En Andosoles y solo en algunos casos se puede formar un horizonte B de poco espesor. Son suelos con un Horizonte A mólico o umbrico situado sobre un horizonte B cámbico o con un horizonte A ócrico, sin otro horizonte de diagnóstico (Cruz, 2006; WRB, 2007).

Cuadro 2. Datos de campo de las unidades ecológicas del Parque Nacional Izta-Popo

Sitio	US	Latitud N	Longitud W	Altitud m	Vegetación arbórea y/o cultivos presentes
		UTM			
Santiago X.	F	2110290	543253	3232	<i>Pinus</i> sp.
Sacromonte 1	F	2114572	523782	2486	<i>P. ayacahuite</i> , <i>Cupressus</i> sp.
Cañada la Calzada	F	2110371	533641	3306	<i>A. religiosa</i>
Camino a Santiago Xalizintla	F	2109544	545460	2973	<i>P. Pseudostrobus</i> , <i>P. ayacahuite</i>
Sacromonte 2	A	2114572	523782	2486	<i>Zea mays</i>
Tlalachony	A	2109251	530605	2859	<i>Zea mays</i>
Zona de cultivo 1	A	2112072	525761	Nd	zanahorias
Capoltiopa 1	A	2109755	545988	2959	<i>Zea mays</i>
Capoltiopa 2	A	2109601	547632	2816	<i>Zea mays</i>
Tlahuapan 1	F	2133920	530680	3355	<i>Pinus</i> sp., <i>Quercus</i> sp.
Tlahuapan 2	F	2137506	529572	3202	<i>Pinus</i> sp
Ávila Camacho	A	2136215	526001	2964	Avena (<i>Avena sativa</i>)
Apatlaco	F	2112404	538595	3690	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp
Paso de Cortés Apatlaco1	F	2112404	538595	3690	Silvoagropecuario <i>Pinus</i> sp., zacatonal
Paso de Cortés Apatlaco 2	F	2111367	537527	3668	<i>Pinus</i> sp
Paso de Cortés Apatlaco 3	F	2111367	537527	3668	<i>Pinus</i> sp
Agua viva 1	A	2116854	525523	2494	Avena (<i>Avena sativa</i>)
Agua viva 2	A	2116854	525523	2494	Maíz (<i>Zea mays</i>)
Agua viva 3	F	2116854	525523	2494	<i>Pinus</i> sp
Vivero 1	A	2110345	531392	2823	<i>Zea mays</i>

Vivero 2	A	2110345	531392	2823	<i>Zea mays</i>
Vivero 2	A	2110345	531392	2823	<i>Zea mays</i>
San Pedro Nexapa 1	A	2110264	531055	2849	Zona de cultivo Abandonada por 30 años
San Pedro Nexapa 2	A	2112068	525775	2525	Zona de cultivo Abandonada
San Pedro Nexapa 3	A	2112068	525775	2525	Avena (<i>Avena sativa</i>)
Loma Larga	F	2110659	538758	3735	<i>Pinus Hartwegii</i> , <i>Senecio</i> <i>sp. Lupinos, Zacatonal</i> Alpino
Camino a Paso de Cortés 1	F	2115982	544603	3133	<i>Pinus ayacahuite</i> , <i>P. Teocote</i> , <i>P.</i> <i>montezumae, Cupresus</i>
Camino a Paso de Cortés 2	A	2115982	544603	3133	Zona no cultivada
Camino a Paso de Cortés 3	A	2115982	544603	3133	Maíz (<i>Zea mays</i>)
Tlayehualpa	A	2114099	548403	2873	Maíz y Haba (<i>Zea mays</i> , <i>Vicia faba</i>)
San Mateo Ozolco	A	2139204	540595	2807	Haba(<i>Vicia faba</i>)
Carretera federal y estatal Puebla 1	A	2139321	535965	2944	Avena ((<i>Avena sativa</i>
Carretera federal y estatal Puebla 2	A	2138798	534154	2999	Terreno circundado por <i>Pinus sp.</i>
Camino hacia Río Frío	A	2138881	534078	2954	Avena (<i>Avena sativa</i>)

US = uso de suelo A = agrícola F = forestal

7.1.4 Área Natural Mil Cumbres

Las unidades ecológicas representativas seleccionadas en esta zona, se encontraron en los Estados de México y Michoacán en el gradiente altitudinal comprendido entre 2509 y 3749 m (Cuadro 3). En la mayoría de los sitios de bosque el estrato arbóreo dominante estuvo representado por el género *Pinus*. De los 2400 a los 2800 m, el tipo de vegetación fue el bosque mixto de pino-encino, con *Cupressus* de los 2800 a los 3200m, dominaron los bosques de *Pinus* y *Abies*.

Cuadro 3. Datos de campo de las unidades ambientales en el Área Natural Mil cumbres.

Sitio	US	Latitud	Longitud	Altitud	Vegetación arbórea y/o cultivos presentes
		N	W	m	
		UTM			
Ajusco 1	F	2123523	470689	3526	<i>Pinus Hartwegii</i>
Ajusco 2	F	2123491	470940	3473	Gramíneas
Nevado de Toluca	F	2115961	416---	3749	<i>Pinus Hartwegii</i>
La Cumbre	F	2150559	367361	2527	<i>Pinus</i> sp.
Camino a "El Rosario"	F	2164885	361352	2545	<i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus</i> sp.
Raíces	F	2119693	415420	3471	Gramíneas
La Cumbre Zona de cultivo 1	A	2150559	367361	2527	<i>Zea mays</i> , calabaza
La Cumbre Zona de cultivo 2	A	2150627	367384	2509	Avena
La Cumbre Zona de cultivo 3	A	2150627	367384	2509	<i>Zea mays</i> , aguacate
"El Rosario" 1	A	2164653	366048	2805	Avena
"El Rosario" 2	A	2164653	366048	2805	Avena, <i>Zea mays</i>
San Agustín Altamirano 1	F	2147440	402241	2618	<i>Pinus patula</i> P. <i>Teocote</i> , P. <i>montezumae</i> , P. <i>spedoestrobis</i>
San Agustín Altamirano 2	F	2147503	402206	2594	Zacatonal, <i>Bacharis</i>
Bosque	F	2151118	388735	2572	<i>Cupressus</i>
Bosque reforestación	F	2151144	388826	2573	<i>Pinus montezumae</i> , P. sp
Zona de cultivo 4	A	2151049	388853	2553	Maíz (<i>Zea mays</i>)
Zona de cultivo 5	A	2151049	388853	2553	Maíz (<i>Zea mays</i>)
Bosque Cerro del Gato	F	2150979	389106	2580	<i>Pinus montezumae</i>

US = uso de suelo A = agrícola F = forestal

7.2 Actividad de la enzima ureasa.

7.2.1 Actividad ureasa en las zonas de estudio

Al comparar los valores de la actividad ureasa entre las zonas de estudio encontramos que en el PNZA se presentó la mayor AU, seguida de la encontrada en el PNIP y la menor en el ANMC con diferencia estadística ($p \leq 0.05$), aunque fue en ANMC donde se encontraron los mayores contenidos de MOS y N-Total (Figura 15 y Cuadro 4). Al respecto Campos *et al.*, (2007), mencionaron que especialmente la vegetación, asociado a diferencias en aportes en niveles materia orgánica, inciden en la actividad enzimática del suelo además del cambio en uso del suelo.

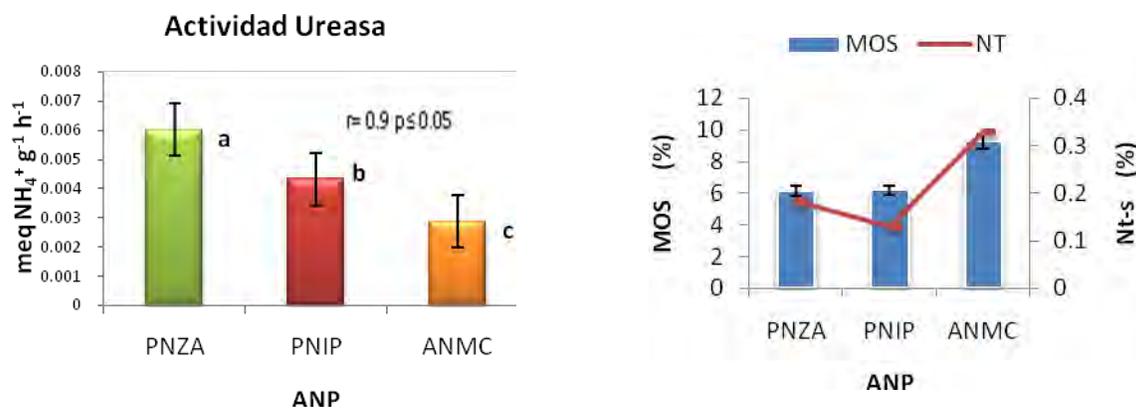


Figura 15. Actividad ureasa y la relación de la MOS con el Nt-suelo en las Zonas de Estudio
*Letras diferentes representan diferencia significativa, Tukey ($p \leq 0.05$).

La relación inversa entre materia orgánica y nitrógeno total del suelo con la actividad ureasa que se muestra en la Figura 15, es consecuencia de la disminución gradual de NH₄⁺ en la solución del suelo y puede también ser indicio de alta actividad de los microorganismos sobre la degradación de la MOS, y bajo nivel de materia orgánica lábil, por la participación de la AU en la liberación de nitrógeno en forma de NH₄⁺.

De las tres ANP en el PNZA, se tuvo la mayor actividad ureasa y en ella se encontraron los menores contenidos de MOS y N-Total por ello se puede considerar que en esta área, la dinámica de los nutrimentos tiende a ser más acelerada.

Cuadro 4. Actividad de la ureasa y parámetros evaluados en las zonas de estudio

ANP	Uso	pH activo	M.O	N-t	AU	
		1:2	%		meq NH ₄ ⁺ g ⁻¹ h ⁻¹	
PNZA	F	5.7	8	1.4	0.004275792	<i>a</i>
	A	5.9	4	1.0	0.00319437	<i>b</i>
PNIP	F	5.6	10	1.4	0.00498978	<i>a</i>
	A	5.8	6	1.0	0.0037805	<i>b</i>
ANMC	F	4.8	11	2.2	0.00310775	<i>a</i>
	A	5.1	7	2.0	0.00269029	<i>b</i>

* Letras diferentes en la columna de AU entre ANPs, representan diferencia significativa, Tukey ($p \leq 0.05$)
* Uso forestal (F), Uso agrícola (A)

En suelos forestales el pH estuvo entre 4.8 y 5.7 mientras que en los suelos agrícolas el pH fue ligeramente superior (5.1 a 5.9) y se observó que tanto en suelo agrícola como en el forestal más ácidos, la AU fue menor y en suelos forestales la AU es mayor que en suelos agrícolas. Estos resultados muestran una dependencia de la AU respecto al pH y al uso agrícola o forestal del suelo. Falkengren *et al.*, (2006) han encontrado que los valores de pH podrían estar relacionados a una mayor transferencia de nutrimentos aportados por la hojarasca y por descomposición de raíces, lo cual estaría ocurriendo en menor magnitud en las zonas cultivadas respecto a las zonas forestales. En el Anexo A, se presenta un resumen del análisis de varianza realizado a las diferentes propiedades que influyeron en la actividad ureasa del suelo.

7.2.2 Actividad de la ureasa en suelos del PNZA

De los resultados de esta investigación se observó que en el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas los suelos de uso forestal presentaron un promedio de $0.0042 \text{ meq NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ de actividad ureasa mientras que en suelos de uso agrícola el promedio fue mucho menor ($0.000319 \text{ meq NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) con diferencia significativa ($p \leq 0.05$). Resultados semejantes fueron encontrados por Pastor y Tremon (2004) que en un estudio sobre el efecto del cambio de uso del suelo sobre la actividad ureasa, encontraron mayor actividad en la capa superficial del suelo y una drástica disminución en lotes recién deforestados (Figura 16). Por otro parte Albanesi y Sánchez (2001) indicaron que la ureasa está presente en todos los horizontes del suelo y que disminuye por el cambio de uso, dependiendo de la posición topográfica. Aunque los cambios en la actividad de la enzima no se estudiaron a diferentes profundidades en esta investigación, de lo anterior se deduce la importancia de conservar el suelo en los ecosistemas naturales.



Figura 16. Actividad ureasa en suelos de uso forestal y zonas agrícolas adyacentes al PNZA
*Letras diferentes representan diferencia significativa, Tukey ($p \leq 0.05$)
*F= forestal A=agrícola

En la Figura 17, se observa que la AU y el N-t de los suelos fueron mayores al incrementarse la altitud (2600 a 3350 m \approx) con pocas excepciones. En los sitios de 2610 y 2719 m, la alta actividad de la ureasa debe atribuirse al suministro de fertilizantes como urea y abonos orgánicos porque estos lugares corresponden a suelos de uso agrícola con cultivo de maíz y avena respectivamente.

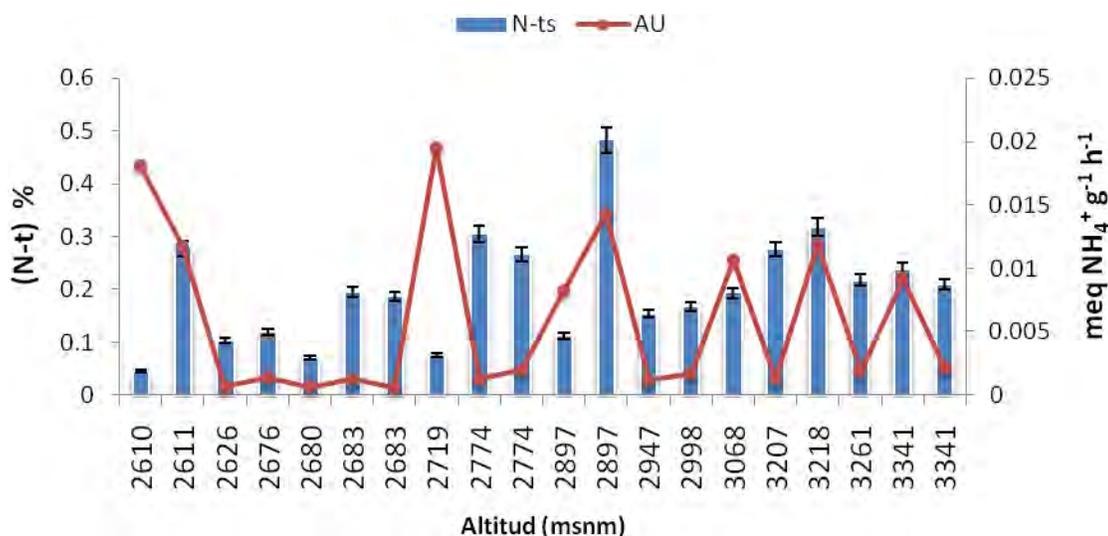


Figura 17. Distribución altitudinal de la actividad ureasa y el nitrógeno total en el PNZA

En suelos bajo cultivo de maíz la actividad ureasa fue de las más altas pero aun fue menor que en suelos bajo individuos del género *Pinus* y *Abies*. En suelos agrícolas bajo avena, se tuvieron los valores de AU más bajos (<0.002 meq NH₄⁺ g⁻¹ h⁻¹), tanto como en los suelos forestales bajo *Quercus* solo y en asociación con Pino y Oyamel (Figura 18).

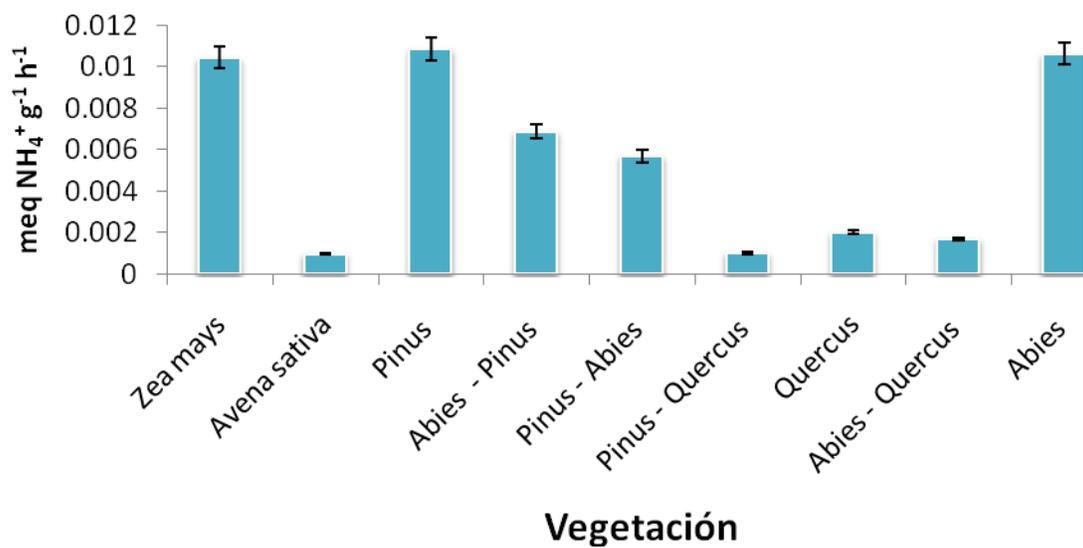


Figura 18. Distribución de la actividad ureasa con el tipo de vegetación en el PNZA

Los resultados descritos muestran que los suelos bajo *Quercus* sp probablemente, por su aporte anual de MOS y la “fácil” degradación de esta, no induce deficiencias de N y su AU es bastante baja. En el caso de los suelos agrícolas, en aquellos donde se cultiva el maíz (planta C-4), se tiene mayor demanda de N respecto a los suelos donde se cultivó avena (C-3) y por ello se presenta, como en suelos forestales, que soportan plantas más demandantes de N, una mayor AU. Comportamiento semejante al que se encontró ha sido reportado por Baligar *et al.*, 1990 quienes han descrito que las plantas C-3 tienen menor requerimiento de N y una mayor eficiencia de este nutrimento.

Por otro lado la mayor actividad ureasa encontrada en suelos agrícolas bajo cultivo de maíz pudo tener su origen en la adición de fertilización nitrogenada aplicada ya que esta enzima cumple un papel importante en el ciclo del nitrógeno, con una participación activa en la liberación de nitrógeno inorgánico (Bandick y Dick, 1999) por lo que puede ser más sensible frente a cambios en el contenido de nitrógeno del suelo.

Además Paolini (2003) indicó que, la actividad ureasa es afectada por la naturaleza de la cobertura vegetal y aquellos suelos que soportan densas poblaciones vegetales, tienden a presentar altos niveles de actividad enzimática, como ocurrió en los sitios donde se encuentran los géneros *Pinus* y *Abies* (Figura 18).

En la Figura 19 se muestra la relación entre la humedad y la actividad ureasa encontrando que la mayor actividad enzimática se presentó en sitios con mayor humedad, decreciendo esta con una menor humedad.

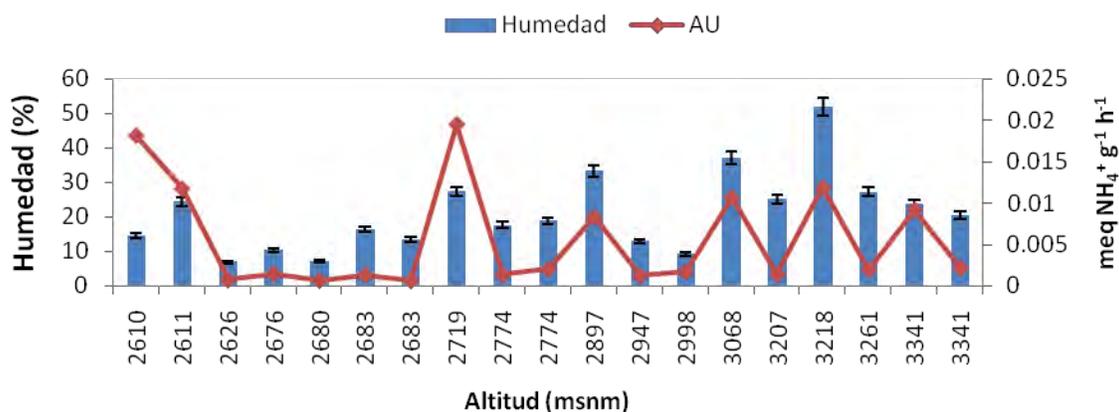


Figura 19. Distribución de la actividad ureasa con respecto a la humedad en el PNZA

Al respecto Contreras *et al.*, (1995), señalaron que las fluctuaciones temporales de la actividad ureasa, son consecuencia de los contenidos de humedad del suelo. Del mismo modo González-Carcedo *et al.*, (1981), indicaron que las variaciones de la actividad ureasa están relacionadas con la humedad de la muestra, registrando bajos niveles de su actividad en suelos con escasa humedad.

En la Figura 20 se observa una mayor actividad enzimática en los suelos conforme aumenta el pH activo y se acerca a la neutralidad ($p \leq 0.05$).

Tal como lo señalan Swensen y Bakken (1998) citado por Mogollón *et al.*, 1997, la disminución del pH en el suelo, generalmente se asocia a una disminución en el número de organismos en las poblaciones bacterias que participan en el proceso de amonificación, la cuales son responsables en gran parte de la secreción de la enzima ureasa, por lo que valores bajos de pH podrían limitar la actividad biológica de los microorganismos, mientras que pH mayores de 6 estuvieron asociados con una mayor actividad enzimática.

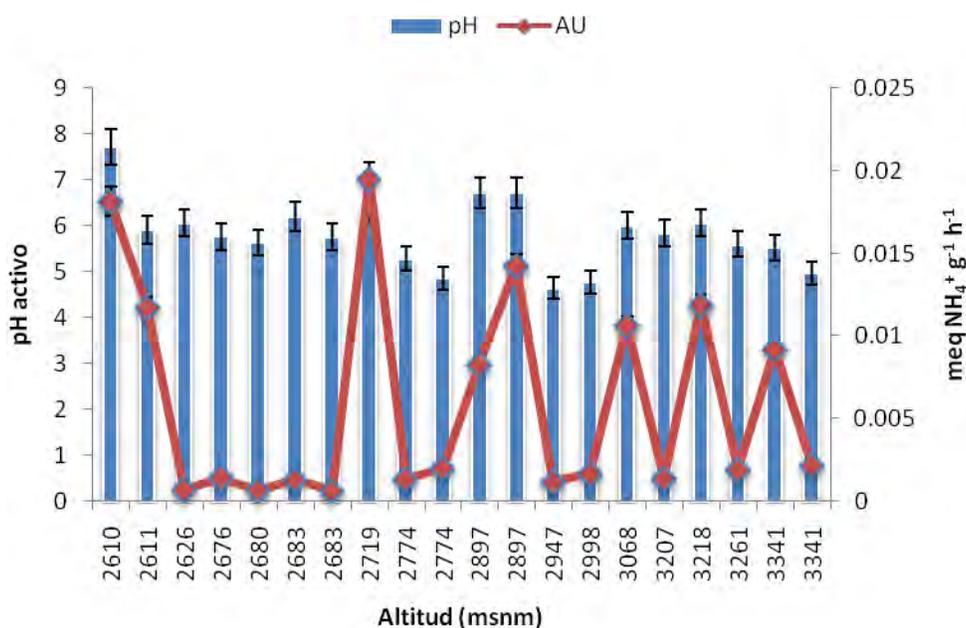


Figura 20. Distribución altitudinal de la actividad ureasa con respecto al pH en el PNZA

7.2.3 Actividad de la ureasa en suelos del PNIP

La tendencia en el PNZA de la AU en suelos con uso forestal y en suelos con uso agrícola se encontró también en los suelos forestales del PNIP y suelos adyacentes con uso agrícola. En la Figura 21 se muestra el comportamiento de la actividad ureasa asociada con cambio en el uso del suelo en las localidades dentro del Parque, mostrando que la ureasa disminuye significativamente ($r=0.9$; $p \leq 0.05$) en suelos agrícolas respecto a los de uso forestal. Afirmando lo citado por autores como Pastor y Tremon (2004) y Albanesi y Sánchez (2001).



Figura 21. Actividad ureasa en suelos de uso forestal y zonas agrícolas adyacentes al PNIP

*Letras diferentes representan diferencia significativa, Tukey ($p \leq 0.05$)

*F= forestal A=agrícola

De la misma manera que en PNZA, para los suelos del PNIP, la AU fue, generalmente, mayor al incrementarse la altitud de 2500 a 3800 m (Figura 22).

En los suelos de los sitios con altitud de 2807 y 2873 m la alta AU se debe como ya se indicó al suministro de fertilizantes como la urea o abonos orgánicos y además por la alternancia de cultivos ya que en estos sitios se encuentra el haba aportando más sustrato para la actividad de la enzima. Además estos lugares corresponden a suelos de uso agrícola con maíz y avena. Agbenin y Tiessen (1994) y Campos *et al*, (2001), encontraron que la mineralización de MO varía a lo largo de la pendiente lo cual, en nuestro estudio, podría generar cambios en los aportes y disponibilidad de nutrimentos cuando aumenta la altitud. En general, el suelo de los sitios más elevados (Figura 22) sufre un mayor arrastre de materiales (Wright, 1992), que inciden en las variaciones en disponibilidad de nutrimentos a lo largo de un gradiente topográfico que podría reflejar el patrón de uso y control de los nutrimentos por parte de la vegetación de acuerdo con la pendiente.

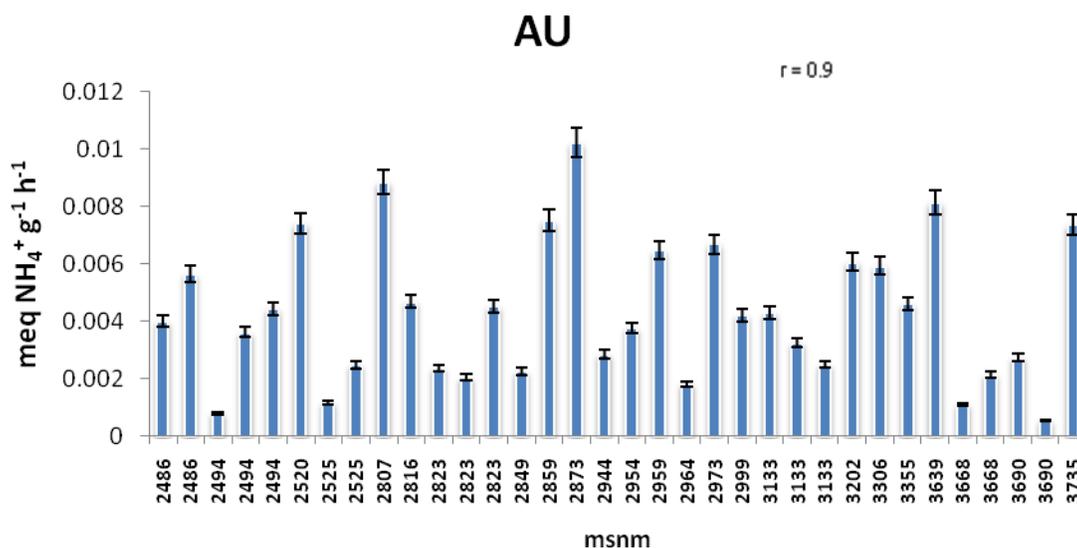


Figura 22. Distribución altitudinal de la actividad ureasa en el PNIP

La mayor actividad de la ureasa que se presentó fue en los suelos bajo vegetación de *Pinus*, *Abies* y suelos bajo el uso agrícola, debido que en estos suelos cultivados la mayoría de los productores usan fertilizantes que ya se han mencionado y que también son sustrato para la enzima. Por lo que en los sitios con cultivo de haba se encontró una alta actividad ureasa, según lo reportado por Skujins (1978), se ha observado un considerable incremento en la actividad ureasa a diferencia de otros cultivos y en el caso de *Pinus hartwegii* (>3700m) también hay mayor AU que puede deberse a que en estos suelos hay buen desarrollo de *Lupinus montanus* y estas leguminosas aportan nitrógeno al sistema por medio de fijación biológica (Figura 23). Este fuerte incremento también se encontró en los cultivos de maíz, lo que puede explicarse de acuerdo a lo señalado por Dkhar y Mishra (1983), quienes indican que la mayor actividad de enzimas, se produce cuando las plantas están en crecimiento (Bremner y Mulvaney, 1978).

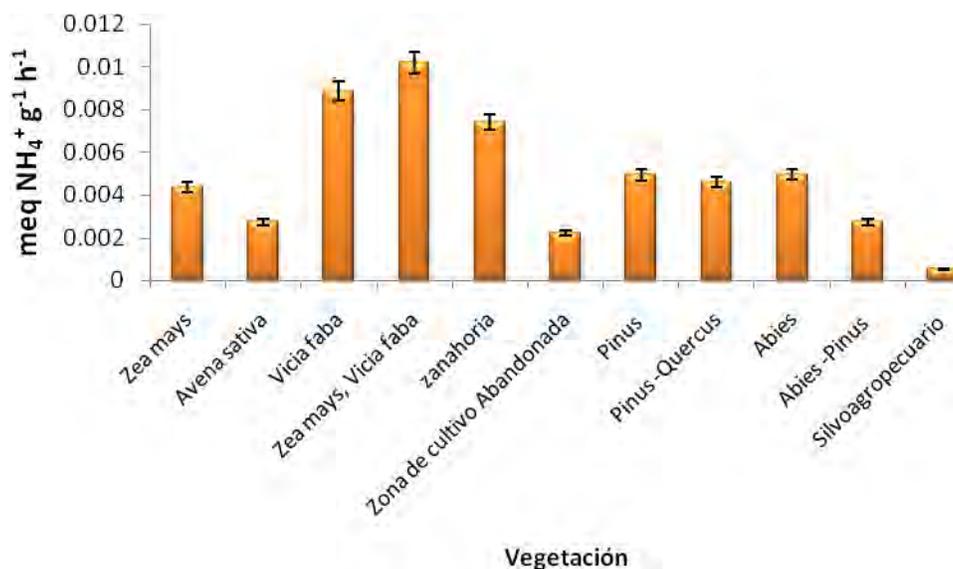


Figura 23. Distribución de la actividad Ureasa con el tipo de vegetación en el PNIP

La actividad ureasa se incrementó con el aumento de la incorporación de fertilizantes o la disminución de la labranza sugiriendo que un exceso en la hidrólisis enzimática puede generar pérdidas por volatilización para el sistema (Kandeler *et al.*, 1999).

De la misma manera que en suelos del PNZA, los valores más bajos de pH del suelo en el PNIP, limitan significativamente la actividad biológica de las bacterias, pues como fue señalado por Swensen y Bakken (1998), la disminución del pH en el suelo generalmente se asocia a una disminución en las bacterias que segregan la enzima ureasa participando en la amonificación. Los valores más altos de la actividad ureasa encontrados reflejan una menor tasa de mineralización del nitrógeno en los suelos de uso forestal evaluados (Figura 24).

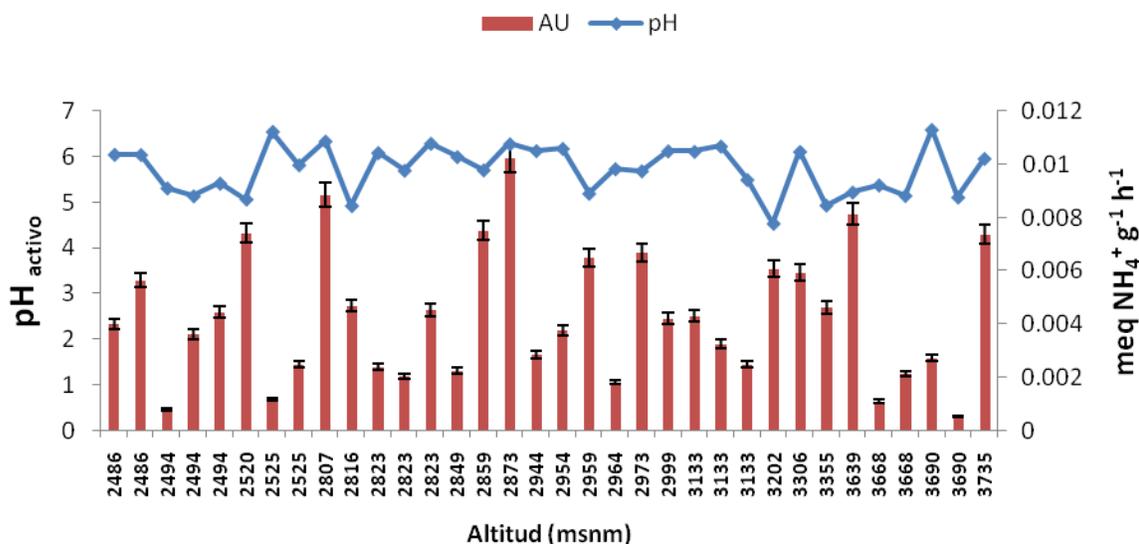


Figura 24. Distribución altitudinal de la actividad ureasa con respecto al pH en el PNIP

7.2.4 Actividad de la ureasa en suelos del Área Natural Mil-Cumbres

En términos generales, la actividad de ureasa fue mayor en los sitios con uso forestal ($p \leq 0.05$) como ya fue expuesto para los suelos del PNZA y del PNIP y, solo para algunos sitios con suelo de uso agrícola, lo cual es consistente con lo ya citado en suelos de las otras zonas estudiadas acerca del suministro de sustratos, tipo urea que son productos intermedios en la degradación de otros compuestos nitrogenados como, las amidas y los ácidos nucleicos (Nannipieri *et al.*, 1990) y son estos sustratos los que inducen la síntesis y actividad de la ureasa (Figura 25).



Figura 25. Actividad ureasa en suelos de uso forestal y zonas agrícolas adyacentes al ANMC
*Letras iguales no representan diferencia significativa, Tukey ($p \leq 0.05$)
*F= forestal A=agrícola

Con respecto a la topografía en el ANMC, se encontraron variaciones en los contenidos de MOS y de N-total que fueron parámetros que influyen en la actividad enzimática. Los resultados mostraron que a mayor altitud, la AU tiende a aumentar en suelos con presencia del género de *Pinus*, estos resultados pueden ser explicados, sí se considera que la altitud es un factor que influye sobre la temperatura y está a su vez al tipo de vegetación. En apoyo a lo anterior, Campos (2003) mencionó que la actividad biológica disminuye conforme aumenta la altitud. También la geoquímica puede reflejar cambios relacionados con la altitud en secuencias topográficas (Figura 26).

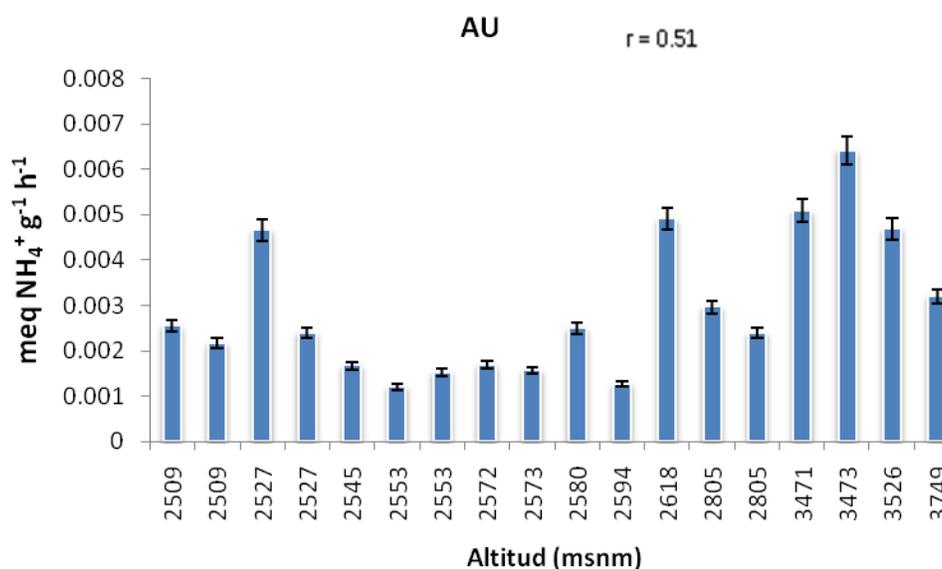


Figura 26. Distribución altitudinal de la actividad ureasa en la ANMC

Respecto al contenido de N total en los suelos del ANMC, la deficiencia de este nutriente en el suelo, favorece a la actividad de la ureasa (Figura 27).

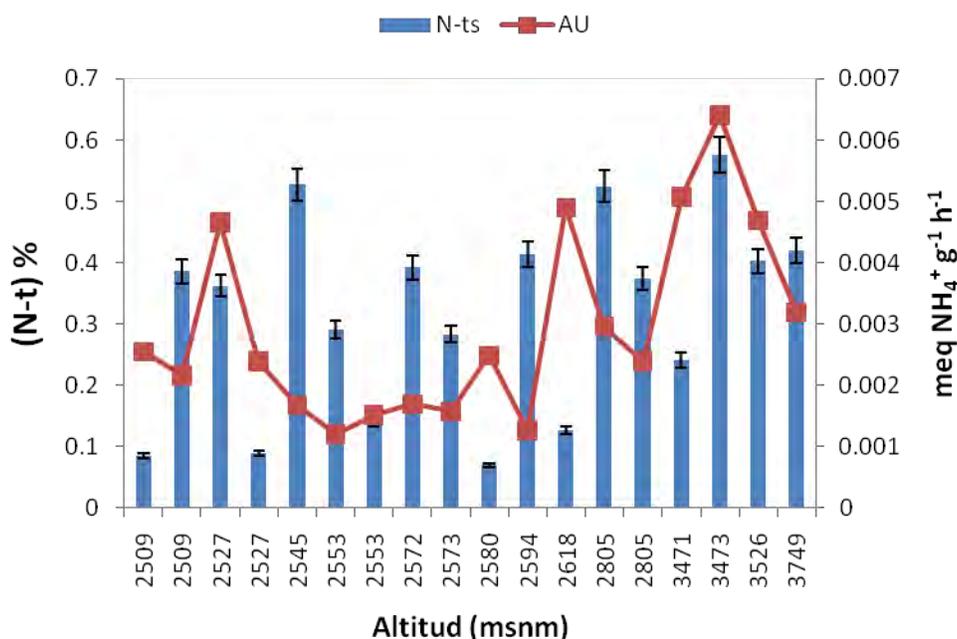


Figura 27. Distribución de la actividad ureasa y el nitrógeno total en la ANMC

La actividad enzimática de la ureasa en el suelo del bosque de *Pinus hartwegii* (Figura 28), presentó el valor más alto en comparación con las zonas de cultivo adyacentes. De manera, semejante a lo ya mencionado, en los suelos de los PNZA y PNIP, en los del ANMC, se observó una notable disminución de la actividad ureasa para las zonas cultivadas (0.0016 y 0.0012 meq NH_4^+ g^{-1} h^{-1}). Otra explicación que apoya lo anterior fue citada por Cardoso (1999) quien estableció que el N suministrado en fertilizantes químicos es una fuente mineral de N y la mayor parte de la reserva de este nutriente que no está inmovilizado en el suelo es absorbido por las plantas y lo asimilan durante la etapa de crecimiento por eso, su persistencia en el tiempo es muy variable dado que la longevidad de las moléculas que contienen nitrógeno está en función de la solubilidad y del grado de ligamiento de los coloides del suelo influyendo en la actividad de la ureasa.

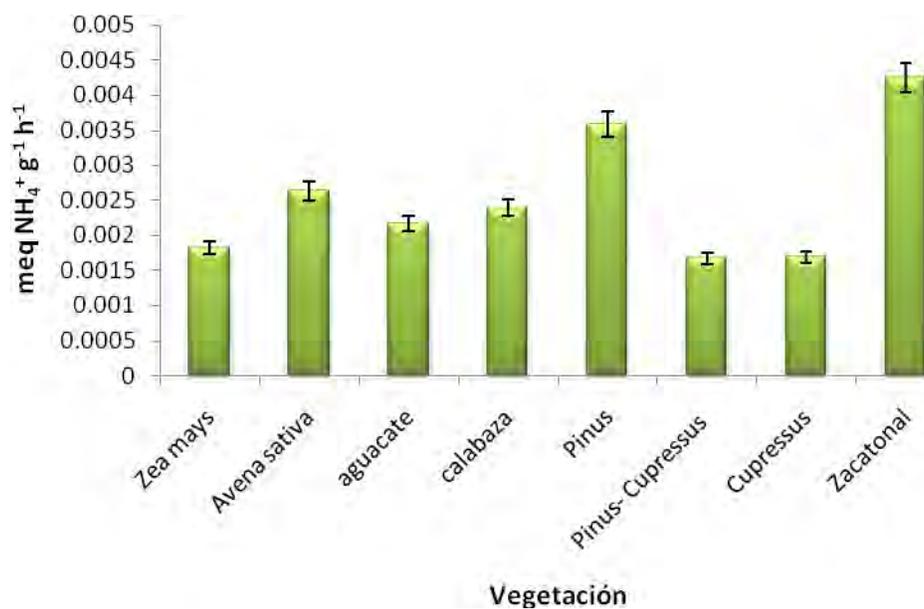


Figura 28. Distribución de la actividad ureasa con el tipo de vegetación en la ANMC

7.3 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

7.3.1 Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

Con referencia al pH, se encontró en este Parque estuvieron entre 4.6 y 7.7, con un promedio de 5.8, lo que se puede atribuir a la naturaleza del material parental de los suelos y al cúmulo de hojarasca en el mantillo (Cuadro 5). Mientras el pH potencial se encontró entre 5.2 y 6.3, con un promedio de 5.1. Los valores obtenidos tanto para pH activo como potencial concuerdan con los reportados por Astudillo (2006). La cantidad de MOS en estos suelos se estableció de 0.33 a 13%, con un promedio de 6.7%. El N del suelo se encontró desde 0.04 hasta 0.48 %. Los sitios que presentaron los mayores porcentajes de MOS y NTS, fueron los sitios ubicados en bosque de *Abies* y *Pinus* (Cuadro 5).

Cuadro 5. Parámetros químicos de suelo en el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas

Sitio	US	pH 1:2		MOS	NTS	NF
		H ₂ O	KCl			
Faldas del Tlaloc 1	F	6.0	5.3	7.7	0.18	3.1
Bosque reforestado	F	6.4	5.2	0.9	0.05	1.2
Cañada	F	6.1	5.4	6.0	0.48	1.6
Pastizal	F	6.7	5.3	5.6	0.09	2.1
Zoquiapan	F	5.5	5.0	13	0.23	1.02
Faldas del Tlaloc 2	F	5.5	5.4	10.9	0.21	0.94
Faldas del Tlaloc 3	F	5.8	5.4	8.5	0.27	1.03
Zona de Reforestación	F	5.6	5.1	1.8	0.06	0.82
Bosque 1	F	5.0	4.8	7.9	0.26	0.83
Bosque 2	F	4.9	4.3	12	0.21	0.75
Zona de cultivo 1	A	7.7	6.3	0.3	0.04	3.3
Zona de cultivo 2	A	5.7	5.0	5.91	0.28	2.13
Zona de cultivo 1	A	6.2	5.1	6.8	0.19	0.96
Zona de cultivo 2	A	5.7	4.6	5.2	0.18	1.06
Zona de cultivo 3	A	6.0	4.1	4.8	0.10	0.93
Zona de cultivo 4	A	5.9	4.3	1.4	0.27	0.64
Zona Pecuaría	A	5.7	4.9	2.8	0.11	0.85
Zona Pecuaría	A	5.2	4.8	2.05	0.30	1.04
Zona de cultivo 5	A	4.6	4	13	0.16	0.49

US = uso de suelo A = agrícola F = forestal NTS= nitrógeno total de suelo NF= nitrógeno foliar

Se han realizado, muchos esfuerzos para relacionar el pH del suelo con la distribución y crecimiento de los árboles y otras plantas, sin embargo la distribución general de los árboles está más estrechamente relacionada con el macroclima y las condiciones de humedad que con el pH, a menudo es la competencia entre las especies la condición que influye (Spurr, 1982; Arbestain *et.al.*, 2004).

La mayor parte de los suelos forestales van de moderada a ligeramente ácidos (6.7 a 4.6) como resultado de la liberación de ácidos orgánicos durante la descomposición de la hojarasca y la lixiviación de las bases del suelo mineral superficial. Con algunas excepciones las especies forestales están bien adaptadas a las condiciones de suelos ácidos, de hecho crecen mejor en un medio moderadamente ácido (Pritchett, 1991). Se ha observado que la acidez de la mayor parte de los suelos forestales varía ligeramente con los cambios estacionales, con un ligero aumento durante el periodo de invierno y los mínimos en verano, rara vez los cambios son superiores a la unidad de pH (Nehring, 1934, citado por Pritchett, 1991). Esta variable se correlaciono con la AU ($r=0.45$; $p\leq 0.05$) ($r=- 0.33$; $p\leq 0.05$) y el N-t del suelo (Anexo A).

7.3.2 Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl

Se encontró que los suelos forestales tuvieron un pH activo de entre 4.7 y 6.1, con un promedio de 5.6, estos valores son cercanos a los reportados por León (2007). La unidad ambiental que mostró una muy fuerte acidez (<5.0) fue Paso de Cortes, la que presentó moderada acidez C. Santiago Xalizintla (5.7), la que tuvieron ligera acidez Apatlaco (6.6 – 7.3) Sacromonte, Santiago y Nexapa. Por otro lado el pH potencial, tuvo un valor más bajo y se estableció en un intervalo de 3.9 a 6.1 con un promedio de 4.8. (Cuadro 6)

El contenido de materia orgánica del suelo (MOS) para el uso forestal se encontró de 4.5 a 6.6%, con un promedio de 5.6%. Mientras que el N total de suelo (NTS) estuvo desde 0.09% hasta 0.57%, con un promedio de 0.25%. En general los suelos que tuvieron mayor contenido de MOS, se encontraron a mayor altitud, como la mayoría del N proviene de la MOS, los sitios con mayor contenido de este macroelemento, estuvieron en los mismos lugares, debido a la cantidad de compuestos químicos que esta presenta, formada por compuestos orgánicos (plantas, animales y microorganismos) en proceso de descomposición (Rice y MacCarthy, 1991, citados por Ussiri y Jhonson, 2007). El contenido de MOS es de suma importancia en suelos forestales gracias a su papel en el almacenamiento y disponibilidad de nutrientes (P y S), reservorio de C y la principal fuente de N (Buckman, 1991) es fuente de energía de la biomasa microbiana, influye en la retención de humedad y la capacidad de intercambio de cationes, da estructura al suelo (Fassbender, 1987; Ussiri y Jhonson, 2007) (Cuadro 6).

Para los sitios agrícolas se encontró que el pH activo estuvo en un intervalo de 4.9 a 6.5 con una media de 5.7. El pH potencial se estableció de 4.2 a 5.8 con un promedio de 4.8.

La materia orgánica del suelo fue de 4 a 9.9% con una media de 6.2. El NTS fue de 0.06 a 0.16 %.

Estos valores resultaron ser más bajos que los presentados por los suelos forestales

Cuadro 6. Parámetros químicos del suelo del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

Sitio	US	pH 1:2		MOS	NTS	NTF
		H ₂ O	KCl			
Paso de Cortés	F	4.7	3.9	7.2	0.56	2.2
Sacromonte 1	F	6.6	6.1	11.1	0.33	1.8
Cañada la Calzada	F	6.1	5.4	7.7	0.21	2.2
Camino a S. Xalizintla	F	5.7	5.1	7.3	0.11	1.8
Tlahuapan 1	F	4.9	4.4	19	0.39	0.51
Tlahuapan 2	F	4.5	4.2	22	0.57	0.4
Apatlaco	F	6.5	5.8	11.7	0.18	0.88
Paso de Cortés Apatlaco 1	F	5.3	5.1	7.9	0.21	0.94
Paso de Cortés Apatlaco 2	F	5.1	4.5	7.6	0.21	1.01
Loma Larga	F	5.9	4.9	8.3	0.11	0.94
Agua viva 1	F	5.4	4.3	9	0.25	0.67
Camino a paso de Cortés 1	F	6.1	4.8	6.6	0.098	0.77
Carretera federal y estatal Puebla 1	F	6.1	4.8	4.1	0.1	0.86
Sacromonte 2	A	6.1	5.2	8.5	0.16	1.5
Tlachalony	A	5.7	4.8	6.1	0.10	2.8
Zona de cultivo Zanahoria	A	5.1	4.2	6.9	0.14	2.6
Capoltiopa 1	A	5.2	4.5	9.0	0.09	1.88
Capoltiopa 2	A	4.9	4.2	5.5	0.06	1.88
Ávila Camacho	A	5.7	5.4	11	0.33	0.30
Paso de Cortés Apatlaco 3	A	5.1	4.7	9.9	0.25	0.76
Agua viva 2	A	5.3	4.7	4.5	0.08	1.17
Agua viva 3	A	5.1	5	4.4	0.07	1.02
Vivero 1	A	6	5	5	0.14	0.83
Vivero 2	A	5.7	5.1	4.6	0.11	0.95
Vivero 3	A	6.2	4.6	5.2	0.09	0.56
San Pedro Nexapa 1	A	6	4.9	5.2	0.06	0.5
San Pedro Nexapa 2	A	6.5	5.3	4.2	0.091	0.91
San Pedro Nexapa 3	A	5.8	4.6	4	0.098	0.64
Camino a paso de Cortés 2	A	6.2	5.7	6.6	0.098	0.66
Camino a paso de Cortés 3	A	5.4	4.8	4.3	0.12	0.86
Tlayehualpa	A	6.2	4.3	4.8	0.13	0.95
San Mateo Ozolco	A	6.3	5.1	6.8	0.05	0.52
Carretera federal y estatal Puebla 2	A	6.1	4.7	6.4	0.19	0.86
Camino hacia Río Frio	A	6.1	5.3	9.1	0.26	0.83

US = uso de suelo A = agrícola F = forestal NTS= nitrógeno total de suelo NTF= nitrógeno foliar

7.3.3 Área Natural Mil Cumbres

Los suelos forestales de esta área, presentaron un pH activo entre 4.6 y 6.5 con un promedio de 5.0. Para el pH potencial los rangos se encontraron entre 4.3 y 5.8 con una media de 5.1 (Cuadro 7).

El contenido de MOS osciló desde 2.5 hasta 15.6%, con un promedio de 9.2%. El NTS estuvo entre 0.07 y 0.84%, con una media de 0.34%. La cantidad de materia orgánica más alta como era de esperarse se encontró en los bosques, y por ende es aquí en estos mismos lugares donde se encontraron las mayores cantidades de nitrógeno. El pH activo del suelo agrícola se encontró entre 4.6 y 5.7 con un promedio de 5.2. Para el pH potencial los rangos se encontraron entre 4.4 y 5.4. Las dos mediciones de pH fueron ligeramente más bajas que las de los bosques. La MOS estuvo en un intervalo de 0.7 a 13.3% y el contenido de NTS fue de 0.09a 0.58%.

Cuadro 7. Parámetros Químicos del suelo en el Área Natural Mil Cumbres.

Sitio	US	pH 1:2		MOS	NTS	NTF
		H ₂ O	KCl			
Nevado de Toluca	F	5.1	4.4	14.1	0.84	3.3
Raíces	F	5.0	4.3	14.1	0.25	2.94
Ajusco 1	F	5.1	4.5	8.5	0.42	3.08
La Cumbre Bosque	F	4.6	4.6	7.3	0.36	3.2
San Agustín Altamirano 1	F	5.0	4.4	4.0	0.12	1.07
San Agustín Altamirano 2	F	4.9	4.8	2.5	0.41	1.0
Bosque	F	4.7	4.6	13.9	0.39	0.99
Bosque reforestación	F	4.6	4.4	15.6	0.28	1.03
Bosque Cerro del Gato	F	4.8	4.6	15.4	0.07	0.88
Ajusco 2	A	5.1	4.6	12.3	0.58	3.68
Raíces	A	4.9	4.5	11.0	0.24	2.94
La Cumbre Zona de cultivo 1	A	5.2	4.5	0.7	0.09	3.01
La Cumbre Zona de cultivo 2	A	5.7	5.4	8.1	0.31	1.41
La Cumbre Zona de cultivo 3	A	4.6	4.4	10.1	0.38	2.1
"El Rosario" 1	A	5.5	5.1	2.8	0.37	2.9
"El Rosario" 2	A	5.3	5.0	2.6	0.37	2.2
Zona de cultivo 4	A	4.6	4.3	9.7	0.29	0.66
Zona de cultivo 5	A	4.6	4.3	13.3	0.14	0.78

US = uso de suelo A = agrícola F = forestal NTS= nitrógeno total de suelo NF= nitrógeno foliar

En los suelos ácidos, con pH menor a cinco, se limita la acción bacteriana y favorece la reproducción de hongos resultando una menor eficiencia en la mineralización y humificación con la consecuente acumulación de MOS (Figura 29). De los suelos forestales presentan pH de moderado a extremadamente ácido, por la liberación de ácidos orgánicos durante la descomposición de la MOS y la lixiviación de las bases intercambiables.

En el PNZA la MOS se obtuvo en un porcentaje promedio de 6.7, en PNIP fue de 7.8 y en el ANMC de 8.7 (Figura 29), de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 para suelos volcánicos, el PNZA, PNIP y la ANMC, están en la clase media (6.1-10.9).

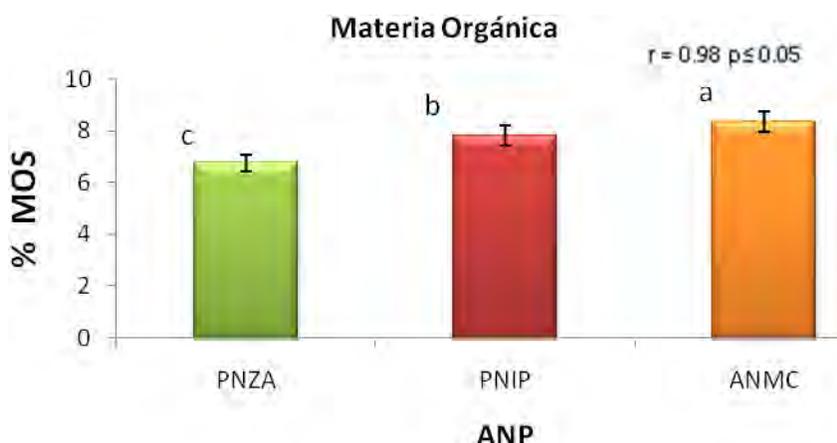


Figura 29. Materia Orgánica del suelo en las zonas de Estudio.
*Letras diferentes representan diferencia significativa, Tukey ($p \leq 0.05$)

La MOS, es un componente esencial en el suelo, se encontraron concentraciones altas en los sitios de uso forestal, ya que en estos lugares la incorporación de materia orgánica es constante, mientras que en la zona agrícola, por las técnicas de cosecha en la cual aprovecha casi en su totalidad de la planta, se ve limitada su incorporación al suelo (Figura 30).

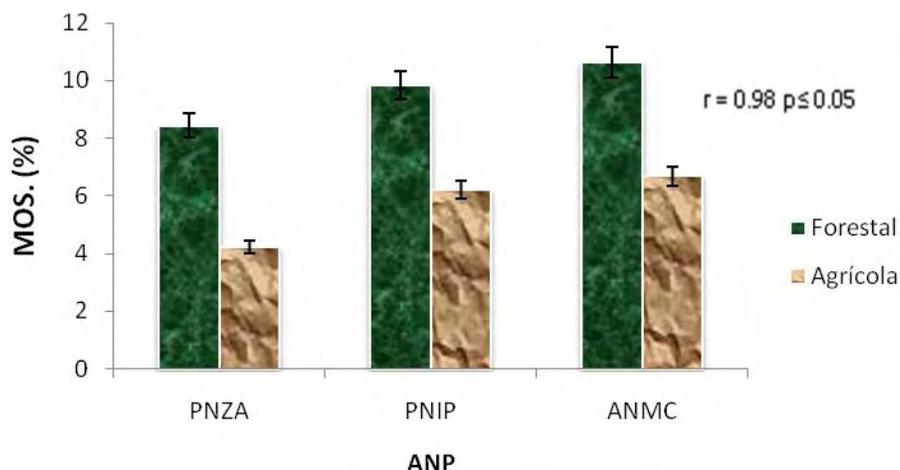


Figura 30 Porcentaje de Materia Orgánica del suelo de uso forestal y zonas agrícolas adyacentes en las áreas de estudio.

El N es elemento con mayor deficiencia en el suelo, su principal fuente proviene de la MOS, solo es disponible mediante la mineralización del ión nitrógeno a ión amonio por bacterias y por actividad enzimática. En este estudio se cuantificó el % N total del suelo, en el PNZA se encontró un porcentaje promedio de 0.280, en el PNIP 0.174, y en la ANMC de 0.319, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 para suelos volcánicos el porcentaje de N en el PNZA, PNIP se ubican en la clase de bajo mientras que la ANMC se ubica con un nivel medio (Figura 31).

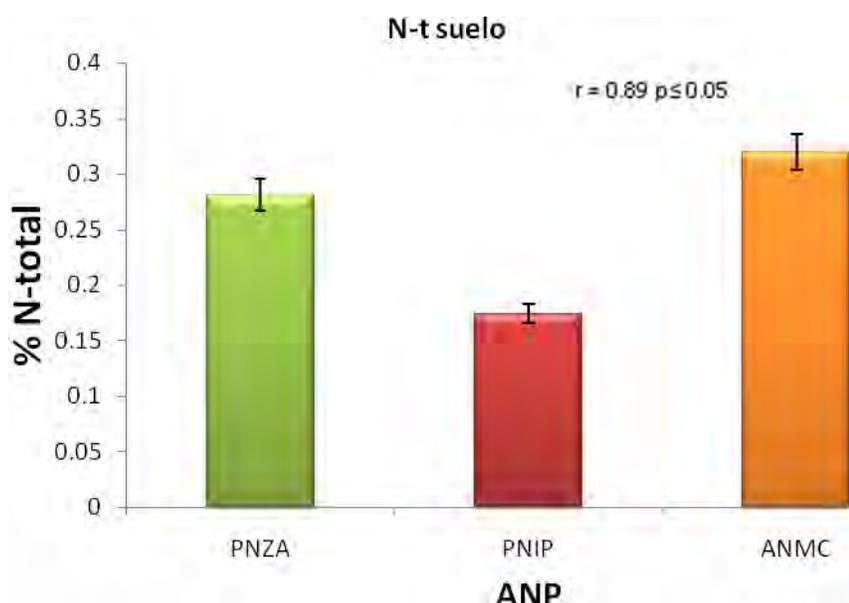


Figura 31. Porcentaje de Nitrógeno total del suelo en las zonas de Estudio
*Letras diferentes representan diferencia significativa, Tukey ($p \leq 0.05$)

Sin embargo la principal causa es la baja tasa de mineralización, esta puede deberse a varios factores: la temperatura del suelo es muy baja, aireación inadecuada, la humedad del suelo es muy alta o deficiente, un pH muy ácido (Ballard, 1985). El N del suelo tuvo correlación negativa con el pH activo ($r = -0.33$; $p \leq 0.05$), la CE ($r = -0.25$; $p \leq 0.05$), la DA ($r = -0.19$; $p \leq 0.05$), el contenido de arcilla ($r = -0.11$; $p \leq 0.05$), y positiva con la Porosidad ($r = 0.17$; $p \leq 0.05$), la Humedad ($r = 0.47$; $p \leq 0.05$) la MO ($r = 0.44$; $p \leq 0.05$) y el N foliar ($r = 0.38$; $p \leq 0.05$) (Anexo B).

El N es uno de los elementos dominantes para el incremento de biomasa, así, los ecosistemas naturales limitados en N necesitan conservar la reserva de N disponible y reducir al mínimo las pérdidas vía producción gaseosa o la lixiviación de N, en detalle en las partes del mundo donde está baja la deposición atmosférica de N y las tasas de la precipitación es alta. Los procesos de producción y consumo de nitratos (NO_3^-), es la forma más móvil de la transformación del N en los ecosistemas (Huygens *et al.*, 2007).

La interferencia antropogénica en el ciclo del nitrógeno puede, no obstante, hacer que haya menos nitrógeno en el ciclo, o que se produzca una sobrecarga en el sistema. Por ejemplo, los cultivos intensivos, su recogida y la tala de bosques han causado un descenso del contenido de nitrógeno en el suelo (algunas de las pérdidas en los territorios agrícolas sólo pueden restituirse por medio de fertilizantes nitrogenados artificiales, que suponen un gran gasto energético). Por otra parte, la lixiviación del nitrógeno de las tierras de cultivo demasiado fertilizadas.

En este trabajo se encontró una mayor cantidad de N mineralizado en el uso forestal respecto a las zonas agrícolas (Figura 32), *Kandeler et al.*(1999), plantearon que la labranza modifica la distribución de MO en el perfil del suelo y que, por lo tanto, presenta una mejor distribución de los residuos orgánicos.

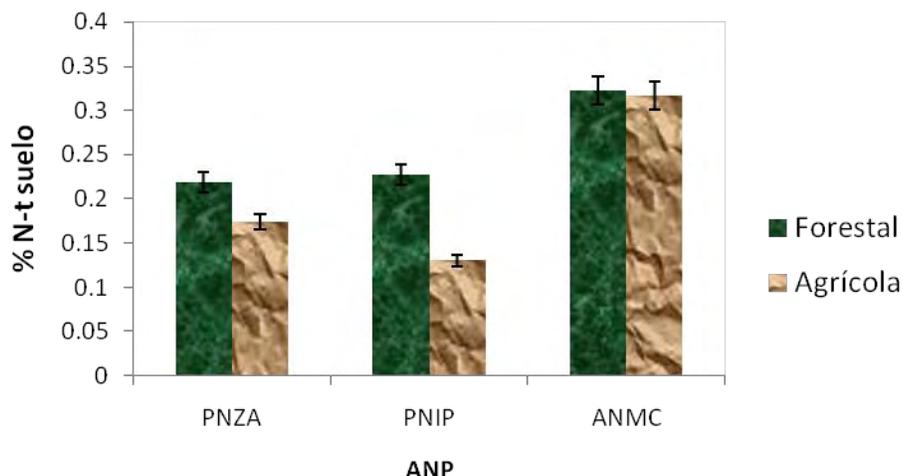


Figura 32. Porcentaje de Nitrógeno total de acuerdo con el tipo de uso del suelo en las áreas de estudio.

Pritchett (1991) menciona que el N permanece inmovilizado en los compuestos orgánicos y que la tasa de mineralización en suelos ácidos son sumamente bajas en bosques no perturbados por que sus requerimientos son a largo plazo y de cierta forma esto se ve reflejado en nuestros resultados, si se toma en cuenta las características de cada una de las zonas de estudio.

Fitzpatrick (1985) indica que el N-t por lo general disminuye con la profundidad y que tiende a aumentar con el incremento de la acidez del suelo.

El N es esencial para el crecimiento de los vegetales dado que es un constituyente de todas las proteínas, se absorbe generalmente en forma de iones nitrato o amonio (Russell, 1968, Wilson *et al.*, 2005). En el estudio de la concentración de N, se encontró diferencia significativa ($p \leq 0.05$), al comparar esta variable entre las diferentes zonas de estudio.

Los resultados obtenidos en el análisis de Nitrógeno total de plantas, permiten conocer el estado nutrimental de la planta ya que el Nitrógeno es uno de los macro elementos esenciales y por lo regular siempre es limitante para la nutrición de las plantas. Sin embargo los agricultores sustituyen esta carencia con fertilizantes. Éste elemento, estuvo en un intervalo de concentración entre 0.20 a 3.51 %, con valor promedio de 1.78 %, con el valor más bajo en PNIP 1.25 % y el más alto en la ANMC 2.08 % ($p \leq 0.05$). Granados (2003) en un estudio sobre Calidad del suelo y el estado nutricional en pinos en el PN-IP reportó al N-foliar entre 0.89 y 1.73 % con promedio de 1.42 %, en tanto que Valderrábano (2005), para el PN-ZA encontró al N en una concentración mínima de 0.92 y máxima con 1.90 % con promedio de 1.42 %.

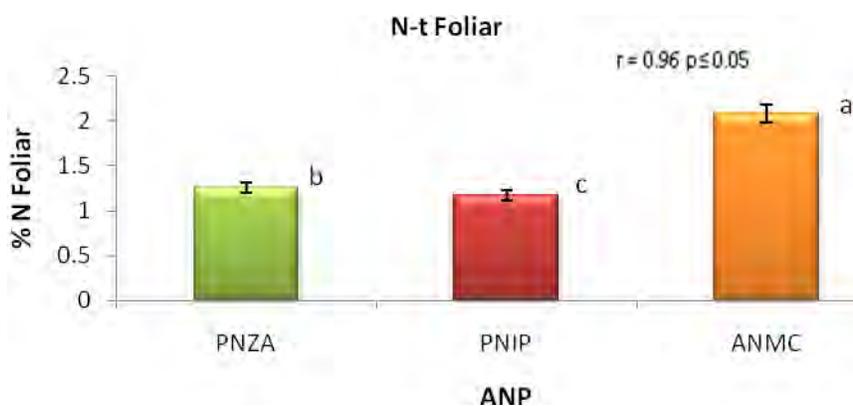


Figura 33. Porcentaje de Nitrógeno Foliar en las zonas de Estudio.
*Letras diferentes representan diferencia significativa, Tukey ($p \leq 0.05$)

El impacto humano en la deposición del N en bosques templados es una preocupación primaria, porque los aumentos en disponibilidad del suelo N tienen el potencial de alterar diversidad de la especie, la composición de la comunidad de la planta, y la función del ecosistema (Vitousek *et al.*, 1997; Aber *et al.*, 1998; Boxman *et al.*, 1998; Gundersen *et al.*, 1998 citado por DeForest *et al.*, 2004).

La fuente de N en la materia orgánica del suelo a menudo aumenta inicialmente la descomposición y los índices de la productividad de los bosques templados (Vitousek Howarth, 1991; Aber *et al.*, 1989, citados por Hassett y Zak, 2005) y la tasa en la cual N de materia orgánica del suelo es controlado por la actividad fisiológica de los microorganismos del suelo (Drury *et al.*, 1991, citados por Hassett y Zak, 2005). Los controles importantes en los índices de la actividad microbiana (y por lo tanto de la fuente de N para el crecimiento vegetal) incluyen temperatura del suelo, disponibilidad y la cantidad del agua, y la composición bioquímica de la planta (Paul y Clark, 1996, citados por Hassett y Zak, 2005).

La acumulación de materia orgánica en el suelo, que generalmente se ve favorecida bajo los sistemas agroforestales es un proceso reversible, donde el cambio por sistemas de producción más intensivos, es responsable de la disminución de los contenidos de MOS, así como una posible disminución de la fertilidad biológica y de la resiliencia del suelo que incluso, puede promover un empobrecimiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Las propiedades físicas del suelo se alteran con menor facilidad que las químicas durante el manejo forestal y el cambio de uso del suelo.

7.4 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

7.4.1 Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

Los resultados de las propiedades físicas determinadas en este Parque Nacional Zoquiapan y anexas (Cuadro 8), indican una CE promedio de 0.065 dS m^{-1} , que está dentro del intervalo de salinidad reportados por León (2007) para suelos de bosques del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas y al igual que los suelos del Parque Nacional Izta-Popo, no presentaron problemas de salinidad como resultado de la semejanza en sustrato geológico y en tipos de vegetación en ambos Parques Nacionales. La DA de los suelos se encontró desde 0.9 hasta 1.1 g cm^{-3} , las cuales pueden ser consideradas bajas; el volumen total considera el volumen ocupado por los poros y los sólidos, constituye un criterio útil para evaluar el drenaje y compactación del suelo y con ello estimar la profundidad a la que pueden penetrar las raíces y la capacidad que tienen estas para almacenar agua en la zona radical (Dominguez y Aguilera, 1987).

León (2007) reporta que valores de DA menores a 1.6 g cm^{-3} en suelos de textura gruesa, permite un buen desarrollo de las plantas. La NOM-021-RECNAT-2000 da valores de DA <1 para suelos volcánicos y orgánicos, en tanto que la Soil Taxonomy menciona que la DA para los Andosoles debe ser cercana a 0.9 o menos. La DR estuvo comprendida entre 1.7 y 2.27 g cm^{-3} , dichos valores entran en los rangos reportados por Valderrábano (2005) y el EP se encontró entre 32.5 y 67.5%, que coinciden con los encontrados por León (2007) en un estudio de calidad de suelos de uso forestal en este Parque Nacional, en general son suelos ligeros; con respecto a esta variable tuvo influencia, sobre el N-t del suelo ($r=-0.199$; $p \leq 0.05$), arcilla ($r=-0.23$; $p \leq 0.05$), limo ($r=0.25$; $p \leq 0.05$) arena ($r=-0.29$; $p \leq 0.05$) y la porosidad ($r=-0.69$; $p \leq 0.05$).

El estudio de las correlaciones mostró diferencia significativa de la DA con el contenido de N, del suelo, la porosidad y la CE (*Anexo B*). Los contenidos de humedad, se encontraron desde 6.89 hasta 49.2%, valores altos en concordancia de la época de lluvias en la que se colectaron estas muestras de suelo.

Estos suelos contienen en su mayoría más de 20% de limo y en promedio 50 % de arena, por lo que su clase textural (CT) es franca y Migajosa.

Cuadro 8. Parámetros físicos de suelo del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas

Sitio	US	CE	DA	DR	Hum	EP	Limo	Arcilla	Arena	CT
		dS m ⁻¹	g cm ³				%			
Faldas del Tlaloc 1	F	0.07	1.1	2.3	30.2	41.9	22	6.2	71.8	Migajón arenoso
Bosque reforestado	F	0.04	1.0	2.0	27.9	49.9	21	30.2	48.8	Migajón arcilloso
Cañada	F	0.10	0.9	2.2	49.2	56.0	31	8.2	60.8	Franco
Pastizal	F	0.04	0.9	2.1	32.4	57.5	36	13.2	50.8	Franco
Zoquiapan	F	0.092	0.85	1.7	23.59	49.50	20.5	9.4	70.1	Migajón arenoso
Faldas del Tlaloc 2	F	0.051	0.78	2.1	27.18	62.43	20	6	74	Migajón arenoso
Faldas del Tlaloc 3	F	0.048	0.83	1.8	25.12	54.50	22	6.7	71.3	Migajón arenoso
Zona de Reforestación	F	0.038	1.0	1.9	15.44	46.88	26	6.7	67.3	Migajón arenoso
Bosque 1	F	0.045	1.2	2.2	17.5	43.5	23	5	72	Migajón arenoso
Bosque 2	F	0.07	0.96	1.8	12	44.9	22.5	5	72.5	Migajón arenoso
Zona de cultivo 1	A	0.08	1.03	2.2	24.3	54.3	31	28.2	43.8	Migajón arcilloso
Zona de cultivo 2	A	0.05	1.05	--	--	--	34	7.38	58.62	Franco
Zona de cultivo 1	A	0.037	0.85	2.0	16.47	56.43	17.5	7.4	75.1	Arena Migajonosa
Zona de cultivo 2	A	0.056	0.97	1.7	13.39	43.59	16	7.6	76.4	Arena Migajonosa
Zona de cultivo 3	A	0.037	1.17	1.7	14.60	32.50	20	8.7	71.3	Migajón arenoso
Zona de cultivo 4	A	0.044	0.876	1.8	6.89	52.25	23	6.5	70.5	Migajón arenoso
Zona Pecuaria	A	0.052	0.922	1.9	10.33	53.08	26	4.3	69.7	Migajón arenoso
Zona Pecuaria	A	0.012	0.93	2.3	18	67.5	24	7	69	Migajón arenoso
Zona de cultivo 5	A	0.073	0.96	1.8	12	44.9	22	5	73	Migajón arenoso

US = uso de suelo A = agrícola F = forestal CT= clase textural

7.4.2 Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatépetl.

De acuerdo al análisis de las propiedades físicas (Cuadro 9), se encontró que los suelos de bosque presentaron conductividad eléctrica (CE) entre 0.022 y 0.121 dS m⁻¹ con un promedio de 0.087 dS m⁻¹, esto indica que ninguno de los suelos de esta zona tiene problemas de salinidad. En referencia a la densidad aparente (DA), estos suelos tuvieron valores entre 0.69 y 1.16 g cm⁻³ (Camino a Santiago Xalic.), se encontró que la DA de los bosques presenta un promedio de 1.00 g cm⁻³, el cual es similar a lo reportado por Astudillo (2006).

Las condiciones de espacio poroso aireación y humedad del suelo es la densidad real (DR) cuyos valores encontrados estuvieron entre 2.02 y 2.58 g cm⁻³ respectivamente. En otra investigación realizada por García (2003) en esta zona se reporta valores que coinciden con los de este estudio, el EP es menor encontrando para los suelos de uso forestal con respecto a las zonas agrícolas, los cuales coinciden con lo reportado por Astudillo (2006). Los valores de humedad del suelo en las unidades ambientales estudiadas se encontraron desde 10 hasta 65 %. Una de las causas de esta variabilidad podría atribuirse en parte a la época del año en que se colectaron las muestras.

La clase textural (CT) determinada con base en los porcentajes de arena, limo y arcilla, fue establecida con ayuda del triangulo de las texturas. Se encontró que los suelos que se estudiaron contienen altos porcentajes de arena (>60%) por lo que la mayoría de los suelos presentaron texturas de arena migajosa y migajón arenosa.

Cuadro 9. Parámetros físicos del suelo del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

Sitio	US	CE	DA	DR	Hum	EP	Limo	Arcilla	Arena	CT
		dS m ⁻¹	g cm ⁻³				%			
Paso de Cortés	F	0.092	0.76	2.30	52	56	14.2	4.5	81.2	Arena Migajonosa
Sacromonte	F	--	1.12	2.29	34.14	51	32	8.7	59.3	Franco
Cañada la Calzada	F	0.121	1.06	2.27	41	53	29	4	67	Migajón arenoso
Camino a S. Xalizintla	F	0.120	1.16	2.38	24.4	51	16.4	4.2	79.5	Arena Migajonosa
Tlahuapan 1	F	0.00087	0.934	2.059	38.7	54	22	6.7	71.2	Migajón arenoso
Tlahuapan 2	F	0.00085	0.98	2.09	53.04	39.2	22	6.72	71.28	Migajón arenoso
Apatlaco	F	0.0559	0.97	2.43	60.09	10.15	20	12	68	Migajón arenoso
Paso de Cortés Apatlaco1	F	0.0541	1.015	2.08	51.27	31.84	16	8	76	Arena Migajonosa
Paso de Cortés Apatlaco 2	F	0.0542	1.174	2.33	49.72	23.87	8	4	88	Arena
Loma Larga	F	0.0465	1.084	2.30	52.72	25.74	19.5	6	74.5	Arena Migajonosa
Agua viva 1	F	0.0589	1.208	2.59	53.35	21.38	25.5	7.5	67	Migajón arenoso
Camino a paso de Cortés 1	F	0.0321	0.809	2.64	63.67	35.22	26	16.36	57.64	Franco
Carretera federal y estatal Puebla 1	F	0.0384	0.727	2.07	64.93	10.25	20.5	7.2	72.3	Migajón arenoso
Sacromonte 2 Maíz	F	0.0403	0.9415	2.65	64.19	15.79	15	6.5	78.5	Arena Migajonosa
Tlalachony	A	0.077	1.40	2.48	37.8	43	21	9.4	69.6	Migajón arenoso
Zona de cultivo Zanahoria	A	0.074	1.46	12.46	13.6	40	19	3.4	77.6	Arena Migajonosa
Capoltiopa1	A	0.098	1.31	2.29	10	44	14	3.4	82.6	Arena Migajonosa
Capoltiopa 2	A	0.065	1.47	2.54	26	42	26	2.4	71.6	Migajón arenoso
Ávila Camacho	A	0.076	1.46	2.56	5.8	43	8	2.7	89.3	Arena
Paso de Cortés Apatlaco 3	A	0.0011	0.95	2.413	59.9	29.21	16	7.64	76.36	Arena Migajonosa
Agua viva 2	A	0.0455	1.051	2.243	53.22	18.92	20	4.5	75.5	Arena Migajonosa
Agua viva 3	A	0.0375	1.113	2.455	54.52	17.55	23	5.5	71.5	Migajón arenoso
Vivero 1	A	0.0618	0.906	2.360	61.13	19.23	28	6	66	Migajón arenoso
Vivero 2	A	0.0372	0.965	1.812	43.24	11.02	18.5	4	77.5	Arena Migajonosa
Vivero 3	A	0.0506	0.783	2.2161	63.39	8.2	23	6.5	70.5	Migajón Arenoso
San Pedro Nexapa 1 Zona Pecuaria	A	0.0412	0.689	1.9042	59.02	12.27	23	7.68	69.32	Migajón arenoso
San Pedro Nexapa 2 Zona Pecuaria	A	0.0414	0.7282	1.7005	57.17	28.77	38	16.65	45.35	Migajón arenoso
San Pedro Nexapa 3	A	0.0447	0.965	1.779	43.95	26.03	32	20.72	47.28	Migajón

										arenoso
Camino a paso de Cortés	A	0.0447	0.958	1.795	44.84	9.429	35	15.7	49.3	Migajón arenoso
Camino a paso de Cortés 3	A	0.0568	0.838	2.221	64.83	14.16	32	17.4	50.6	Migajón arenoso
Tlayehualpa	A	0.0833	0.715	2.087	64.91	16.16	36	17.3	46.7	Migajón arenoso
San Mateo Ozolco	A	0.0546	0.895	1.546	41.27	21.09	26.5	9.86	63.64	Migajón arenoso
Carretera federal y estatal Puebla 2	A	0.08701	1.042	2.437	56.78	18.86	17	5.5	77.5	Arena Migajonosa
Camino hacia Río Frio	A	0.0694	0.758	2.209	65.74	25.29	18.5	8	73.5	Migajón arenoso
US = uso de suelo		A = agrícola		F = forestal		CT= clase textural				

Respecto a los sitios agrícolas (lugares con cambio de uso de suelo), se encontró que la CE estuvo entre 0.65 y 0.98 dS m⁻¹ con un promedio de 0.078 dS m⁻¹, por lo que al igual que los bosques no tienen problemas de salinidad. La DA fue de 1.31 a 1.47 g cm⁻³, con un promedio de 1.42 g cm⁻³. Los suelos de estos lugares al estar sometidos a un constante laboreo aunado a que no tienen una cubierta de mantillo, ocasiona que se produzca un proceso de compactación, porque tienen una mayor densidad, menor espacio poroso y contenido de humedad, que los suelos de los bosques cercanos.

7.4.3 Área Natural Mil Cumbres.

Los valores de CE para los suelos forestales del Área Natural Mil Cumbres (Cuadro 10) indican que ninguno de ellos tiene problemas de salinidad, ya que se encontraron valores en el intervalo de 0.041 a 0.192 dS m⁻¹ y una media de 0.105 dS m⁻¹. La DA se encontró entre 0.5 y 0.9 g cm⁻³. Los valores más bajos se deben al elevado contenido de materia orgánica del suelo como la que se deposita anualmente al suelo. Mientras que la DR encontrada estuvo entre 1.4 y 2.1 g cm⁻³.

En cuanto a los suelos agrícolas, la CE se encontró de 0.012 a 0.207 dS m⁻¹ con una media 0.157 dS m⁻¹, dichos valores son más altos que los suelos de los bosques y esto tal vez es causado por el uso de fertilizantes. La media para la densidad aparente fue de 0.9 g cm⁻³, las cuales resultaron ser ligeramente más altas que las de los forestales, aunque aun resultan ser densidades bajas, esto se debe a la materia orgánica y a que no llevan mucho tiempo como suelos agrícolas. El promedio para la DR fue de 2.1 g cm⁻³. El EP promedio encontrado fue de 56.2%, el cual es menor que el forestal. La humedad del suelo fue alta y se encontró con una media 37%.

Respecto a la clase textural, la mayoría de los suelos tanto agrícolas como forestales, se caracterizaron por ser Migajones. Aunque la mayoría de ellos contienen una considerable cantidad de arena más del 65%, están más desarrollados que los suelos de las otras áreas naturales ya que contienen en promedio una mayor cantidad de partículas finas, más del 35% de limo y 15% de arcilla.

Cuadro 10. Parámetros físicos del suelo del Área Natural Mil Cumbres

Sitio	US	CE	DA	DR	HS	EP	Limo	Arcilla	Arena	CT
		dS m ⁻¹	g cm ⁻³							
Nevado de Toluca	F	0.053	0.8	2.0	30	58.0	26	7.4	66.6	Migajón arenoso
Raíces	F	0.097	0.8	2.1	34	60.5	20	8.6	71.4	Migajón arenoso
Ajusco 1	F	0.086	0.8	1.8	39	57.2	58.7	6.7	34.6	Migajón limoso
La Cumbre Bosque	F	0.094	0.9	2.1	44	54.5	76.2	14.2	9.6	Migajón limoso
San Agustín Altamirano 1	F	0.004	0.78	2.3	5.8	66	11.5	7.5	81	Arena Migajosa
San Agustín Altamirano 2	F	0.005	0.83	2.2	22	63	26.5	9.86	63.6	Migajón arenoso
Bosque	F	0.009	0.98	2.9	29	63	17	5.5	77.5	Arena Migajonosa
Bosque reforestación	F	0.006	0.90	2.8	7.5	67	15	6.5	78.5	Arena Migajónosa
Bosque Cerro del Gato	F	0.008	1.1	2.4	30	54	20	6	74	Arena Migajosa
Ajusco 2	A	0.089	0.8	1.9	46	58.1	23.4	8.6	68.0	Migajón arenoso
Raíces	A	0.196	0.9	1.2	29	54.9	55.7	9.7	34.6	Migajón limoso
La Cumbre Zona de cultivo 1 Maíz	A	0.209	---	2.5	--	--	13	7	80	Arena Migajosa
La Cumbre Zona de cultivo 2	A	--	---	2.0	--	--	25	10	65	Migajón arenoso
La Cumbre Zona de cultivo 3	A	0.184	0.8	1.9	40	57.3	81.5	14.8	3.6	Migajón limoso
"El Rosario" 1	A	0.207	1.0	0.1	33	49.3	30	11.2	58.8	Franco
"El Rosario" 2	A	0.0012	0.65	2.0	34	30.3	26	12	62	Migajón arenoso
Zona de cultivo 4	A	0.0278	1.0	2.5	8.8	58.4	18.5	8	73.5	Migajón arenoso
Zona de cultivo 5	A	0.0148	1.1	2.4	20.8	54.5	20	7	73	Migajón arenoso

US = uso de suelo A = agrícola F = forestal CT= clase textural

En este sentido Bockheim (1991) menciona que los suelos forestales se caracterizan por sus texturas gruesas e influye en su productividad, pero está puede ser de carácter más bien indirecto que directo. Los suelos arenosos profundos y gruesos a menudo sostienen cultivos deficientes de pino, cedros y robles con bajos requerimientos de humedad y nutrimentos. En consecuencia, la productividad de este tipo de suelos aumenta a medida que se incrementan los porcentajes de limo y arcilla presentando mayores contenidos de N que los suelos arenosos.

7.5 Análisis Estadístico

En el estudio de correlación entre AU con las características fisiográficas de los sitios y con las propiedades (físicas, químicas y bioquímicas) del suelo que fueron evaluadas, se observó que el cambio de vegetación natural a terrenos de cultivo induce una disminución de la AU (signo negativo de la correlación) en una correlación que, aunque baja ($r=-0.181$) es significativa. Esta tendencia de disminución de la AU, también se observó al aumentar el contenido de la arena ($r=-0.305$), lo que confirma que la fracción gruesa influye en disminución de la estabilidad y actividad de la enzima en los suelos. Muchos son los factores que influyen en la actividad enzimática y en particular la actividad de las enzimas de los suelos, recibe efectos multivariados citando, la humedad, el contenido de los sustratos, aireación o porosidad y fracciones separadas del suelo, además del pH entre otras muchas variables (Cuadro 11).

Cuadro 11. Coeficientes de correlación entre la actividad ureasa (AU), con las propiedades físicas, químicas del suelo.

AU	US	Sitio	pH		Humedad	Arcilla	Arena	N-t foliar
			activo	potencial		%		
	$r= -0.181$	$r= -0.279$	$r= 0.451$	$r= 0.171$	$r= 0.159$	$r= 0.394$	$r=-0.305$	$r= 0.226$
	P≤0.05							

US= Uso de suelo.

Nota: En la base de datos para el AE, a los suelos con uso forestal se les asignó el No. uno, mientras que los de uso agrícola y pecuario se les asignó el No. dos.

De esta manera, el pH activo del suelo influyó en la AU ($r=0.45$; $p\leq 0.05$), a su vez el contenido de arcilla tuvo influencia positiva en la AU ya que la arcilla forma con la enzima un complejo refractario que impide que sea atacada por los microorganismos y mantiene su actividad hidrolítica.

En el Cuadro 12 se presentan los datos de la actividad de la ureasa en cada tipo de uso del suelo de las 3 ANP, en él se observa que hubo una alta actividad enzimática en las zonas forestales y una notable disminución de N-NH_4^+ en el de uso agrícola. Una posible explicación a este hecho sería que la hidrólisis de compuestos orgánicos llevada a cabo por las enzimas para la liberación de amonio se llevo a cabo por una vía más rápida en comparación a la liberación de N durante la mineralización de la MO.

Cuadro 12. Pruebas de significancia de la actividad ureasa en las zonas de estudio.

Uso	PNIP	PNZA	ANMC
AU			
_____ meq NH_4^+ g^{-1} h^{-1} _____			
F	<u>0.00427</u> a	<u>0.00498</u> a	<u>0.003107</u> a
A	<u>0.00319</u> b	<u>0.00378</u> b	<u>0.002690</u> b

*F: uso forestal, A: uso agrícola

* Dentro de columnas, letras diferentes representan diferencia significativa, Tukey ($p \leq 0.05$)

Barracough (1997) demostró que es posible que esas enzimas degradan la MO a aminoácidos simples, los que pueden ser absorbidos por los microorganismos y plantas, ocurriendo una desaminación en el interior de la célula, con liberación sólo del amonio en exceso a e innecesario a los requerimientos metabólicos de los microorganismos involucrados (vía directa).

La alteración del suelos en los bosques, modifican el hábitat de los microorganismos que participan y controlan los ciclos del C y N, por lo que el cambio a zonas de cultivo alteran la composición y las funciones microbianas, de tal manera que afectan la productividad a largo plazo del bosque (Bradley, 2001; Donegan *et al.*, 2001; Setälä *et al.*, 2000, citados por Hassett y Zak, 2005).

Una gran utilidad que tiene la AU, es que mediante el conocimiento de ésta, se puede llegar a estimar una importante fracción del NH_4^+ disponible para las plantas, lo cual representa un aporte al conocimiento sobre la disponibilidad y ciclo de nutrientes. En cálculos básicos que se ejemplifican, a continuación se estima que hay liberación ligeramente mayor a 150 y hasta más de 550 kg NH_4^+ ha^{-1} día^{-1} por lo que se puede afirmar que es posible utilizar a la AU como un indicador de la calidad edáfica en bosques templados (Cuadro 13).

Cuadro 13. Cantidad de NH_4^+ liberado por la AU en cada una de las tres ANP

PNZA	PNIP	ANMC
kg NH_4^+ ha^{-1} día^{-1}		
564	405	157

Como se mostró en las figuras 29, 30 y 31, los porcentajes de MOS y N-Total se presentaron en mayor cantidad en los suelos del ANMC en comparación a los suelos d PNZA y PNIP y también se mencionó que ante condiciones de insuficiencia de N asimilable, la actividad de la ureasa suele incrementarse. De esta forma puede explicarse que la liberación de amonio como consecuencia de la AU sea entre 3.5 y 2.5 veces menor en el ANMC respecto a la del PNZA y PNIP respectivamente. (Martens *et al.*, (1995). Mencionaron que la descomposición de residuos de animales o plantas en el suelo liberan nutrientes esenciales tales como: nitrógeno, fósforo y azufre, necesarios tanto para el crecimiento microbiano como para la nutrición de las plantas. Es aquí donde las enzimas, mediante transformaciones bioquímicas, están involucradas en la descomposición de la MO y en el ciclo de los nutrientes en el suelo.

En otro análisis estadístico realizado a los datos generados se efectuó el Análisis Estadístico Multivariado (AEMV) el cual requiere estandarizar los valores de cada variable antes de realizarlo. La estandarización es necesaria por la diferencia en magnitudes que en forma natural tienen las diversas propiedades físicas, químicas y bioquímicas y para efectuarse, se les resta a cada valor de cada parámetro su media aritmética y se divide entre la desviación estándar (Pérez, 1996).

En una evaluación de la Evaluación de Calidad del Suelo, Granados (2003) propuso un modelo predictivo basado en el cálculo de las ecuaciones de componentes principales determinados por variables robustas cuyo eigenvalor fue superior a uno. Utilizando el modelo descrito, con los resultados del Análisis de Componentes Principales (ACP), se encontró que de 15 propiedades del suelo determinadas (variable originales, VO), se obtuvieron 6 componentes principales (CP), los cuales quedaron definidos por tres variables robustas (VR) que explican el 76% de la varianza entre sitios (Cuadro 14).

El 76% de la varianza acumulada está dada por 6 CP los cuales poseen eigenvalor mayor a 1.

Cuadro 14. Componentes Principales de las propiedades del suelo

CP	Eigenvalor	Varianza	Varianza Acumulada	
			%	
1	3.4317	22.88	22.88	C1 =-Arena
2	2.5916	17.28	40.16	C2 = N-t suelo
3	1.7016	11.34	51.5	C3 =- Porosidad
4	1.4362	09.57	61.08	C4 = pH activo
5	1.2204	08.14	69.21	C5 = DR
6	1.0586	07.06	76.27	C6 = MOS

En el Cuadro 14 se observa la dispersión de las varianzas para los 6 componentes formados a partir de las VO o parámetros analizados.

Los CP fueron definidos por las siguientes VR. CP1: Arena; CP2: N-t suelo y; CP3: Porosidad; CP4: pH activo CP5: DR y CP6= MOS (Granados 2003).

(Ver Anexo C).

8. CONCLUSIONES

Con relación al objetivo general, se encontró que la AU fue mayor en suelos forestales en comparación con los de uso agrícola quienes fueron en tiempo anterior también suelos con uso forestal.

La eliminación de la vegetación natural y utilización de especies cultivables produjo disminución de materia orgánica del suelo que incide en agotamiento de las reservas de nitrógeno potencialmente mineralizable aunada a la reducción de incorporación de nitrógeno mediante fijación biológica.

A mayores altitudes, en sitios con pendientes fuertes, predominio de coníferas y donde el pH es más ácido, la mineralización de la MO se lleva a una tasa más lenta, reflejando una actividad microbiana menos eficiente que en las partes bajas de las 3 ANP. Al considerar al pH como factor que influye en la actividad ureasa del suelo, se encontró que valores de pH del suelo mayores de 6, estuvieron asociados con una mayor actividad enzimática.

En los sitios evaluados, el cambio uso del suelo, el pH del mismo, y especialmente la vegetación, está relacionada con la actividad enzimática del suelo. Los valores de pH podrían estar relacionados a una mayor transferencia de nutrientes como el K, Mg y Ca, aportados por la hojarasca, y por descomposición de raíces, lo cual estaría ocurriendo en menor magnitud en las zonas cultivadas.

Con los resultados del (AEMV), mediante la técnica de Análisis de Componentes Principales (ACP), se encontró que de 15 propiedades del suelo determinadas (variable originales, VO), se obtuvieron 6 componentes principales que son: el % de arena; N-t suelo, porosidad, MOS, densidad real y el pH activo las cuales explican el 76% de la varianza entre sitios, lo que indica que estas 6 propiedades junto con la actividad ureasa sirven para determinar la calidad de los sitios evaluados.

Los suelos con mayor calidad se encontraron en sitios con asociaciones de coníferas. En general los suelos forestales tienen una calidad alta que se manifiesta en un estado nutrimental adecuado para las especies del género *Pinus* y *Abies religiosa* del PNZA, PNIP y el ANMC. Este trabajo permite señalar que la actividad ureasa del suelo si es sensible a cambios en el uso del suelo, por lo que puede ser utilizada como un indicador para evaluar su calidad.

RECOMENDACIÓN. Para poder realizar una evaluación integral del ecosistema, es necesario combinar el estudio de la actividad ureasa con el de otras enzimas y nutrimentos disponibles.

9. LITERATURA CITADA

- Aciego, P. J.C. y Brookes P.C., 2008. Nitrogen mineralization along a pH gradient of a silty loam UK soil. *Soil Biology & Biochemistry* 40: 797–802
- Acosta, V M, Cruz L, Sotomayor R D y Pérez A L., 2007. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. *Applied Soil Ecology* 35: 35–45.
- Agbenin, J. O., y Tiessen H., 1994. Phosphorus transformations in a toposequence of Lithosols and Cambisols from semi-arid northeastern Brazil. *Geoderma* 62:345- 362.
- Aguilar, S. A. 1995. Retos y oportunidades de la ciencia del suelo al inicio del siglo XXI. *Terra*. Vol. 13 (1). México.
- Albanesi, A., y Sánchez. P A. 2001. Efecto de la agricultura convencional en algunas formas del N en una toposecuencia de la Región Chaqueña, Argentina. *Agriscientia* Vol XVIII: 3-11.
- Andrews, S.S. Karlen D. L, y Cambardella C. A., 2004. The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1945–1962.
- Aparicio, V. y Costa J.L., 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil & Tillage Research* 96 155–165.
- Arbestain, M., Mourenza, C., Álvarez, E., Macías, F. 2004. Influence of parent material and soil type on the root chemistry of forest species grown on acid soils. *Forest Ecology and Management*. 193 (3), p 307-320.
- Astudillo, B. Y., 2006. Fosfatasa ácida y alcalina del suelo y su efecto en la disponibilidad del P en suelos de Bosques templados de México, Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Bachmeier, K. L., Williams A. E, Warmington J R y Bang S S., 2002. Urease activity in microbiologically-induced calcite precipitation. *Journal of Biotechnology* 93 171–181.
- Baligar, V. C., Duncan R. R., and. Fageria N. K. 1990. Soil-Plant interaction on use efficiency in plants: An overview. Pp 352-374. *In* Crops as enhancers of nutrient use. Baligar, B. C. and R. R. Duncan Eds., Academic Press Inc. San Diego, Calif., USA.
- Ballard, T. M. 1985. Evaluating forest stand nutrient status. Faculty of forestry, University of British Columbia, Vancouver. 55pp
- Bandick, A. y Dick, R. 1999. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biol. Biochem.* 31: 1471- 1479.

- Barton, D, Ellis EA, Armijo-Canto N, Beck C.T. (2004) The institutional drivers of sustainable landscapes: a case study of the "Mayan Zone" in Quintana Roo, Mexico. *Land Use Policy* 21: 333-346.
- Barracough, D. 1997. The direct or MIT route for nitrogen immobilization. *Soil Biol. Biochem.* 29:101-108.
- Bautista, C.M., 2001. Indicadores de la calidad de suelo en tres cronosecuencias del bosque mesófilo, Sierra Norte de Oaxaca. Tesis de Maestría. COLPOS, Montecillo.
- Benintende, S.M. Benintende, C., Sterren A., De Battista J. J. 2008, Soil microbiological indicators of soil quality in four rice rotations systems, *ecological indicators* 8: 704 –708
- Bockheim, J. G. 1991. Suelos forestales, In: Young R. A (Ed.). Noriega Editores. México. pp 119-139.
- Bremner, J. y Mulvaney, R. 1978. Urease activity in soils. En: Burns, R (Editor) *Soil Enzymes*. Academic Press. Londres, Inglaterra 149-187.
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. *In: Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Edited by C. A. Black *et al.* Agron. Series 9. Amer. Soc. Agron. Madison, Wisconsin. pp. 1149-1178..
- Bremner, J. 1996. Recent research on problems in the use of urea as nitrogen fertilizer. *Fertilizer Research* Vol. 42:321-329.
- Bünemann, E.K. 2008. Enzyme additions as a tool to assess the potential bioavailability of organically bound nutrients. *Soil Biology & Biochemistry* 40 (2008) 2116–2129.
- Buckman, H. O.y Brady, N. C. 1991. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Limusa, México, 590 p.
- Burns, R.G. (1982). Enzyme activity in soil: Location and a possible role in microbial ecology. *Soil Biol. Biochem.*14: 423-427.
- Campos, A.J 2003. Disponibilidad y flujo de nutrimentos en una toposecuencia con bosque tropical seco en México. *Agrociencia* 37:211-219.
- Campos, J, Maass J., y De Pablo L. 2001. Intemperismo en un bosque tropical seco de México. *Agrociencia* 35:245-254.
- Campos, A.C., Oleschko L K., Etchevers B J., Hidalgo M C., 2007. Exploring the effect of changes in land use on soil quality on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico) *Forest Ecology and Management* 248 174–182

- Cardoso, F. 1999. Rizosfera. *In*: Sociedad Brasileira de La Ciencia del Suelo(ed). Microbiologia do solo. Campinas, 499 pp.
- Castro, L, F. Gavi R, Peña J.J. C, R. Núñez E y. Etchevers J.D. 2006. Eficiencia de Recuperación de N y K de tres Fertilizantes de lenta liberación (N and K Recovery Efficiency of Slow Release Fertilizers) TERRA Latinoamericana Vol. 24 N° 2, pp. 277-282.
- Challenger, A. 1998. Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México, pasado, presente y futuro. UNAM, Instituto de Biología, Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), Sierra Madre A. C. México. 847 pp.
- Challenger, A. 2003. Conceptos generales acerca de los ecosistemas templados de montaña de México y su estado de conservación. Editorial. Instituto Nacional de Ecología, México, Agrupación Sierra Madre S.C., D. F., pp. 315, sitio web <http://www.ne.gob.mx/publicaciones/libros/395/challenger/html>.
- Comisión Forestal Estatal del Estado de Michoacán (COFOM) 2007. <http://cofom.michoacan.gob.mx/caracteristicas.htm> consultado el 10 octubre del 2007.
- CONANP, 2007, en <http://iztapopo.conanp.gob.mx/infbasica.php>. Consultado el 10 de noviembre del 2007
- Contreras, F., Rivero, C., Paolinl, J. 1995. Efecto de la incorporación de residuos orgánicos y dos tipos de labranza sobre la actividad de la ureasa en un alfisol. Venesuelos. 3(1): 2-6
- Corona, R. A., 2007. Actividad ureasa del suelo y la dinámica de C y N en bosques templados de México. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza. UNAM
- Cotler, A. H. 2003. Características y manejo de suelos en ecosistemas templados de montaña. en: Conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Sánchez, O. Vega, E. Peters, E and Monroy, O. (eds) Instituto Nacional de Ecología pp: 153-159.
- Cruz, F. G. 2003. Mecanismos de adaptación de la raíz de cereales ante estrés nutrimental en suelos ácidos. Tesis de Doctorado en Ciencias (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM. México, D. F.
- Cruz, F. G., 2006, Ecología Del Suelo Un Enfoque Hacia La Nutrición Mineral De Plantas Superiores, UNAM, F.E.S. Zaragoza ,1ª Edición.
- Dale, V.H. , Peacock A.D. , Garten Jr C. T., Sobek E.. Wolfe A. K., 2008, Selecting indicators of soil, microbial, and plant conditions to understand ecological changes in Georgia pine forests, ecological indicators 8: 818 – 827

- DeForest, J. L., Zak D.R., Pregitzer K. S., and Burton A. J. 2004. Atmospheric Nitrate Deposition, Microbial Community Composition, and Enzyme Activity in Northern Hardwood Forests. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:132–138.
- Dkhar, M. y Mishra, R., 1983. Dehydrogenase and urease activities of maize (*Zea mais L.*) field soils. *Plant and Soil* 70: 327-333.
- Delgadillo, J M., R. Ferrera C, A. Spínola G, A. Hernández Garay y M.A. Cobos P. 2005. Fijación Biológica de Nitrógeno en una pradera de trébol hubba/ballico de corte o de pastoreo (Biological Nitrogen Fixation in a Cut or Grazed Hubba Clover/Ryegrass Sward) *TERRA Latinoamericana* volumen 23 número 1, pp. 73-79
- Domínguez, R. I. y Aguilera, N.H. 1987. Metodología de análisis físicos y químicos de suelos. Facultad de Ciencias. UNAM, 34 p.
- Doran, J. W. y Parkin T. B. 1994. Defining and Assessing Soil Quality. pp. 3-22. *In:* Doran J., Coleman D, Bezdicek D. y Stewart B. (Ed.). *SSSA Special Publication no. 35.* Wisconsin, U.S.A.
- Duchafour, P., Souchier, B.1984. Edafología . Edafogénesis y Clasificación. Masson S.A. Barcelona, España.
- Etchevers, J.D, Bautista M. A. y Vergara M.A. 2000. Calidad del suelo, indicadores de calidad y captura de carbono, en: *La edafología y sus perspectivas al siglo XXI.* Colegio de Posgraduados, Montecillos, México
- Falkengren, G. U., Dirk J. B., Brunet J.2006. Land use effects on soil N, P, C and pH persist over 40–80 years of forest growth on agricultural soils. *Forest Ecology and Management* 225:74–81.
- FAO, 2007. Situación de los Bosques del Mundo, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma
- Farjon, A., Pérez J. A. y Styles B. T. 1997. Guía de campo de los Pinos de México y América Central. Instituto Forestal de Oxford, Universidad de Oxford-Royal Botanic Gardens, Kew. Unión Europea-Bélgica.
- Fassbender H, W, y Bornemisza. E.1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura de cooperación para la agricultura. San José Costa Rica.
- FitzPatrick, E. 1985. Suelos. Su formación, Clasificación y Distribución. Compañía Editorial Continental. México. 430 pp.

- Fließbach, A., Oberholzer H.R., Gunst L., Mäder P. 2007. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118:273–284.
- Follmer, C. 2008. Insights into the role and structure of plant ureases. *Phytochemistry* 69 18–28.
- García, E. 1973. *Modificaciones al sistema de clasificación climática Koeppen*. Segunda edición, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- García, H., S. 2003. Indicadores de calidad del suelo y estado nutrimental de *Abies religiosa* (H. B. K.) Schl. et Cham. en la exposición occidente de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Gonzalez-Carcedo, S., Fuentes, M., Pérez, M. 1981. Influencia del secado y pre-tratamientos térmicos del suelo sobre la actividad ureásica y otros parámetros biológicos relacionados. *Edaf. Agrobiol.* 40(9-10): 1377-1386.
- Granados, D. A. R. 2003. Calidad del suelo y estado nutricional del género *Pinus* en la vertiente occidental de Iztaccíhuatl y Popocatépetl. Tesis de Licenciatura. UNAM.
- Green, D.M. y Oleksyszyn M. 2002. Enzyme Activities and Carbon Dioxide Flux in a Sonoran Desert Urban Ecosystem, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:2002–2008.
- INF, 2001. Cartografía de recursos forestales y uso del suelo. *Inventario Nacional Forestal 2000 (cifras preliminares)*. Subsecretaría de Gestión Ambiental, SEMARNAT.
- INE, 2007. <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/2/manan.html>. Consultado el 8 de junio del 2007
- INEGI, 1984. Mapa topográfico 1: 50000, E14:B41, Ameca
- Hassett, J. E. y. Zak D.R 2005. Aspen Harvest Intensity Decreases Microbial Biomass, Extracellular Enzyme Activity, and Soil Nitrogen Cycling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:227–235 .
- Huygens, D., Rütting T., Boeckx P., Van Cleemput O., Godoy R., Müllerb,C., 2007, Soil nitrogen conservation mechanisms in a pristine south Chilean Nothofagus forest ecosystem, *Soil Biology & Biochemistry* 39: 2448–2458.
- Iyyemperumal, K. y Shi W.2008. Soil enzyme activities in two forage systems following application of different rates of swine lagoon effluent or ammonium nitrate. *Applied Soil Ecology* 128–136
- Jackson, M. L., 1982, *Análisis químicos de suelos*, Ed., Omega 4a ed., Barcelona, España.

- Kandeler, E., Tschirko D. y Spiegel H. 1999. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a chernozem under different tillage management. *Biol. Fertil. Soils* 28: 343-351.
- Karlen, D. L., Stoot, D. E. 1994. A Framework Evaluating Physical And Chemical Indicators Of Soil Quality. *In*: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdizek y B.A. Stewart (eds.). *Defining Soil Quality For A Sustainable Environment*. SSSA Special publication. 35. ASA, CSSA and SSSA, Madison, Wisconsin.
- Lambin, E. F, Baulies X, Bockstael N, Fisher G, Krung T (2003) Land-use an land cover change (LUCC):implementation strategy. IGBP Rep. 48, IHDP Rep. 10, Int. Geosph. Biosph. Program., Int. Hum. Dimens.Glob. Environ. Change Program., Stockholm. 125 pp.
- León, M. H. M. 2007. Estimación del contenido de C en suelos de bosques templados y su relación con la calidad del suelo. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM
- Manson, K. F., U y Falkengren-Grerup. 2003. The effect of nitrogen deposition on nitrification, carbon and nitrogen mineralization and litter C, N ratio in oak (*Quercus robur L*) forest. *Forest Ecol. Management* 179: 455-467.
- Márquez, I.R. 2004. Políticas públicas y agricultura campesina: Patrones de uso del suelo y deforestación en el oriente de Tabasco. *Avances de Investigación*. El Colegio de la Frontera Sur, Villahermosa. 75 pp.
- Martens, D. Johanson D. y Frankenberg Jr D. 1992. Production and persistence of soil enzymes with repeated addition of organic residues. *Soil. Sci.* Vol. 153: 53-61.
- Martínez, M. 1992. Los pinos mexicanos. Ed. Botas. 3ª edición, México, 261p.
- Masera, O., Astier M., y Lopéz S. 2000. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales. El marco de evaluación MESMI. Mundi Prensa. México.
- Mogollón, J. P., Garcia-Miragaya, J., Sánchez, L.F., Chacón, NM., y Araujo, J. 1997. Nitrógeno potencial disponible en suelos bajo diferentes árboles de sombra. *Agron. Tromp.* 47:87-102.
- Monokrousos N., Papatheodorou E.M., Diamantopoulos J.D., Stamou G.P. 2006. Soil quality variables in organically and conventionally cultivated field sites. *Soil Biology & Biochemistry* 38: 1282–1289.
- Moron, A., 2005. Indicadores para el diagnostico de la calidad de suelos en sistemas agrícolas. *In*: Marelli, H.J. (Ed.), *Indicadores de Calidad de Suelo*. Seminario Internacional. Marcos Juárez, Argentina.

- Nannipieri, P., Stefano G. y. Ceccanti B. 1990. Ecological significance of the biological activity soil. pp. 293-355. *In*: J.M. Bollag y G. Stotzky (eds.). Soil biochemistry V.6. Marcel Dekker. New York.
- Nannipieri, P. 1994. The potential use of soil enzymes as indicators of soil productivity, sustainability, and pollution. *In*: Soil biota: management in sustainable farming systems.
- National Center for Atmospheric Research, www.windows.ucar.edu/.../nitrogencycle_sm.sp consultado el 10 octubre del 2007
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.
- Nortcliff, S. 2002. Standardization of soil quality attributes. Agriculture, Ecosystems and Environment. 88:161-168.
- Palmer, G. R. y Truoch F. R. 1989. Introducción a la ciencia del suelo. Manual de laboratorio AGT Eds. México.
- Paolini, J. 2003. Las enzimas del suelo y su aplicación en la caracterización bioquímica de sitios. INTERNET: <http://biblioteca.ivic.ve/bases/index00s.htm> (Agosto 23, 2008).
- Pritchett, W. 1991. Suelos forestales, propiedades, conservación y mejoramiento. Editorial Limusa-Grupo Noriega Editores, México. 634p.
- Pascual, J. A., Moreno J. L., Hernández T, y García C. 2002. Persistence of immobilized and total urease and phosphatase activities in a soil amended with organic wastes. Bioresource and Technology. 82: 73-78.
- Pastor, M.J. y Tremon O. 2004. Efecto del cambio de uso de la tierra sobre la actividad ureásica en agroecosistemas cafetaleros Estado Falcon. Universidad Nacional Experimental Francisco Miranda. Coro, Estado Falcón.
- Paul, E.A. y Clark F.E., 1989. Soil microbiology and biochemistry. Academic Press, San Diego. 275 pp.
- Pérez, C. 1996. Econometría y Análisis Estadístico Multivariable con Statgrafics. Técnicas avanzadas, RAMA, México.
- Quiñones, A., Martínez B., Legaz F., 2007, Influence of irrigation system and fertilization management on seasonal distribution of N in the soil profile and on N-uptake by citrus trees, Agriculture, Ecosystems and Environment 122, 399-409.

- Quiroz, G. V. 2002. Relación nutrimental nitrógeno/ fósforo y nitrógeno/ potasio en maíz y su influencia sobre la eficiencia de estos nutrimentos. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Richards, L. A. 1990. Diagnostico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. 6ª ed., Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. Limusa, México.
- Roldán A., Salinas J.R., Alguacil M.M., Díaz E., Caravaca F., 2005. Soil enzyme activities suggest advantages of conservation tillage practices in sorghum cultivation under subtropical conditions *Geoderma* 129: 178– 185.
- Romeu, E. 1995. Los pinos mexicanos, récord mundial de biodiversidad. *Biodiversitas*. Vol.1:11-14.
- Russell, J. 1968. Las condiciones del suelo y el crecimiento de las plantas. Editorial Aguilar, 4ª edición, España, 801p
- Sall, S. N. y Chote L J. 2002. Phosphatase and urease activities in a tropical sandy soil as affected by soil water-holding capacity assay conditions. *Comm. In: soil. Sci and Plant Ann.* 33: 3745-3755.
- Sardans J. y Peñuelas J. 2005, Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest, *Soil Biology & Biochemistry* 37: 455–461.
- Schoenholtz, S. H., Miegroet Van., Burguer J. A. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and oportunities. *For. Ecol. Manage.* 138: 335-356.
- SEMARNAT, 2000. Indicadores para la evaluación del desempeño ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reporte 2000. México, D. F.
- Seybold, C.A., Mausbach M.J., Karlen D.L. y Roger H.H., 1997. Quantification of soil quality. pp 387-404. *In: Rattan, L., J.M. Kimble, R.F. Follett. B.A. Stewart. (ed.). Soil processes and the carbono cycle. CRC. U.S.A*
- Sirko, A y Brodzik R. 2000. Plant ureases: Roles and regulation. *Acta Biochimica Polonica* Vol. 47 (4) 1189–1195
- Shukla, M.K., Lal R., Ebinger M.. 2006, Determining soil quality indicators by factor análisis. *Soil & Tillage Research* 87 194–204.
- Skujins, J., 1978. History of abiotic soil enzymes research. En: R G Burns (Ed) *Soil Enzymes*: 1-49 Academic Press, London.
- Spurr, S, H. 1982. *Ecología forestal*. AGT Editor, S, A. México. 690p.

- Tabatabai, M. 1994. Soil Enzymes. In :R.W. Weavwe, J.S. Angle and P.S. Bottomley. 1994. Methods of Soil Analysis. Part 2 Microbiological and Biochemical Properties. Soil Science of America. U.S.A.
- Tamayo, J. L. 1990. *Geografía moderna de México*. Trillas, México.
- Trejo, L T, Fernando C. Gómez M, Rodríguez M Ma. y Alcántar G G. 2005. Fertilización Foliar Con Urea en la Partición de Nitrógeno en espinaca. (Foliar Fertilization with Urea on the Partitioning of Nitrogen in Spinach) Terra Latinoamericana volumen 23 número 4:494-503.
- Trasar-Cepeda, C., Gil-Sotres, F., Leiro´s, M.C., 2007. Thermodynamic parameters of enzymes in grassland soils of Galicia, NW Spain. *Soil Biology and Biochemistry* 39: 311–319.
- Uri, V., Lohmus K, Kund M, Tullus H. 2008. The effect of land use type on net nitrogen mineralization on abandoned agricultural land: Silver birch stand versus grassland. *Forest Ecology and Management* 226–233.
- USDA-NRCS 2006. Claves para la Taxonomía de Suelos (10ª edición)
- Ussiri, D. A. y Jhonson, C. E. 2007. Organic matter composition and dynamics in a northen hardwood forest ecosystem 15 years after clear-cutting. *Forest Ecology and Management*.240:131-142.
- Valderrábano, G. J. M. 2005. Calidad del Suelo y Estado Nutrimental de la Vegetación Forestal en el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza. UNAM
- Van der Stelt B. Temminghoff E.J.M., Van Vliet P.C.J., Van Riemsdijk W.H. 2007. Volatilization of ammonia from manure as affected by manure additives, temperature and mixing. *Bioresource Technology* 98:3449–3455
- Velázquez, A. J: F, Mas, J. L., Palácio, J.R., Díaz, R. Mayorga, C. Alacantara, R. Castro y Fernández T., 2002. Analisis de cambio de uso del suelo. Informe tecnico. Convenio INE-Instituto de Geografía. UNAM.
- Venkatesan, S, and Senthurpandian V K., 2006. Comparison of enzyme activity with depth under tea plantations and forested sites in south India, *Geoderma* 137 212–216.
- Vernimmen, R.R.E., Verhoef H.A., Verstraten J.M., Bruijnzeel L.A., Klomp N.S., Zoomer H.R., Wartenbergh P.E.. Nitrogen mineralization, nitrification and denitrification potential in contrasting lowland rain forest types in Central Kalimantan, Indonesia. *Soil Biology & Biochemistry* 39:2992–3003

- Vergara, S. M. y Etchevers, J. D. 2004. Indicadores de calidad del suelo en laderas de la Sierra Norte. Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología. UNAM. Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-WWF, México, p 585-602.
- Wilson, S. Mc.G., Pyatt D.G. 2005. Indices of soil nitrogen availability for an ecological site classification of British forest. *Forest Ecology and Management*. (220) 51-65
- WRB, 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Wright, S.J. 1992. Seasonal drought, soil fertility and the species density of tropical forest plant communities. *Trends in Ecology and Evolution* 7:260-263.
- Yimer, F., Ledin S., Abdelkadir A .2007 , Changes in soil organic carbon and total nitrogen contents in three adjacent land use types in the Bale Mountains, south-eastern highlands of Etiopía. *Forest Ecology and Management* 242 337–342
- Zantua, M. I. Dumenil L. C, y Bremner J.M. 1997. Relationships between soil urease activity and other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*. 41:350-352.

10. Anexo (A) Resumen de Análisis de varianza.

	G.L	S.C	C.M	F	Probabilidad
pH _{activo}	70	110.3	1.6	60.1	<.0001
ANP	2	29.6	14.8	564.3	<.0001
US	1	3.8	3.8	143.5	<.0001
Si	67	76.9	1.15	43.8	<.0001
pH _{potencial}	70	50.3	0.71	11.05	<.0001
ANP	2	3.3	1.62	25.02	<.0001
Si	67	46.9	0.70	10.8	<.0001
C.E	70	0.33	0.005	8.5	<.0001
ANP	2	0.116	0.059	105.11	<.0001
Si	67	0.21	0.003	5.65	<.0001
D.A	70	10.64	0.15	17.06	<.0001
ANP	2	1.036	0.52	58.17	<.0001
Si	67	9.6	0.143	16.08	<.0001
D.R	70	27.16	0.39	8.71	<.0001
ANP	2	2.8	1.4	31.56	<.0001
US	1	1.3	1.3	29.13	<.0001
Si	67	23.04	0.34	7.72	<.0001
Porosidad	70	19345.8	276.4	6.13	<.0001
ANP	2	3269.5	1634.7	36.26	<.0001
Si	67	15534.3	231.8	5.14	<.0001
Humedad	70	43563.5	622.33	39.11	<.0001
ANP	2	5819.2	2909.6	182.8	<.0001
US	1	1770.6	1770.6	111.3	<.0001
Si	67	35973.7	536.9	33.7	<.0001
MOS	70	4707.2	67.2	283.6	<.0001
ANP	2	142.2	71.1	299.9	<.0001
US	1	1011.6	1011.6	4266.6	<.0001
Si	67	3553.5	53	223.7	<.0001
Arcilla	70	8118.0	115.9	38	<.0001
ANP	2	206.6	103.3	33.9	<.0001
US	1	28.7	28.7	9.42	0.0024
Si	67	7882.6	117.6	38.5	<.0001
Limo	70	12847.2	183.5	16.4	<.0001
ANP	2	75.2	37.6	3.37	0.0366
Si	67	12750.3	190.3	17	<.0001
Arena	70	31671.7	452.4	28.7	<.0001
ANP	2	531.3	265.6	16.9	<.0001
US	1	100.3	100.3	6.37	0.0124
Si	67	31040.1	463.3	29.4	<.0001
N-t suelo	70	4.97	0.07	26.5	<.0001
ANP	2	1.034	0.517	192.5	<.0001
US	1	0.224	0.224	83.44	<.0001
Si	67	3.716	0.055	20.65	<.0001
AU	70	0.0039	0.000057	27.5	<.0001
ANP	2	0.000257	0.000128	62	<.0001
US	1	0.000077	0.000076	37	<.0001
Si	67	0.00365	0.000054	26.3	<.0001
N-t foliar	70	239.7	3.4	70.3	<.0001
ANP	2	41.5	20.7	426.4	<.0001
US	1	7.24	7.2	148.6	<.0001
Si	67	190.8	2.8	58.5	<.0001

Anexo (B) Correlaciones de Pearson

Procedimiento Correlaciones de Pearson

VARIABLES: ANP US Si Alt pHa pHK CE DA DR
POR HUM MOS arci lim are Ns AU Nfol

Estadísticos simples

Variable	N	Media	Desviación típica	Suma	Mínimo	Máximo
ANP	288	2.52778	2.05141	728.00000	1.00000	6.00000
US	288	1.52778	0.50010	440.00000	1.00000	2.00000
Si	288	36.50000	20.81878	10512	1.00000	72.00000
Alt	284	2916	384.64470	828180	2226	3749
pHa	288	5.57917	0.64914	1607	4.50000	7.70000
pHK	288	4.90347	0.47493	1412	3.90000	6.30000
CE	288	0.04085	0.03976	11.76430	0.0004000	0.37080
DA	288	0.96910	0.20915	279.10000	0.60000	1.60000
DR	288	2.18160	0.35736	628.30000	1.40000	3.60000
POR	288	54.51042	10.05178	15699	25.00000	75.00000
HUM	288	24.63194	12.83899	7094	6.00000	70.00000
MOS	288	7.73611	4.07249	2228	1.00000	23.00000
arci	288	8.97222	5.53222	2584	2.00000	32.00000
lim	288	22.96528	7.40224	6614	8.00000	44.00000
are	288	68.06250	11.10025	19602	43.00000	89.00000
Ns	288	0.21718	0.14257	62.54800	0.04400	0.61600
AU	288	0.00444	0.00410	1.27930	0.0002000	0.01980
Nfol	288	1.41972	0.93392	408.88000	0.11000	3.94000

Prob > |r| suponiendo H0: Rho=0 Número de observaciones

	ANP	US	Si	Alt	pHa	pHK	CE	DA	DR
ANP	1.00000	-0.00075	0.62331	-0.19039	-0.48153	-0.14887	-0.50269	-0.27775	0.06272
		0.9898	<.0001	0.0013	<.0001	0.0114	<.0001	<.0001	0.2887
	288	288	288	284	288	288	288	288	288
US	-0.00075	1.00000	0.13788	-0.35521	0.13059	0.00693	-0.03188	0.02989	-0.14823
	0.9898		0.0192	<.0001	0.0267	0.9068	0.5900	0.6135	0.0118
	288	288	288	284	288	288	288	288	288
Si	0.62331	0.13788	1.00000	-0.17079	-0.46551	-0.30176	-0.10489	-0.00708	0.28828
	<.0001	0.0192		0.0039	<.0001	<.0001	0.0755	0.9048	<.0001
	288	288	288	284	288	288	288	288	288
Alt	-0.19039	-0.35521	-0.17079	1.00000	-0.05022	0.05135	0.12428	-0.12649	-0.06638
	0.0013	<.0001	0.0039		0.3991	0.3886	0.0363	0.0331	0.2648
	284	284	284	284	284	284	284	284	284

	ANP	US	Si	Alt	pHa	pHK	CE	DA	DR
pHa	-0.48153 <.0001 288	0.13059 0.0267 288	-0.46551 <.0001 288	-0.05022 0.3991 284	1.00000 288	0.54498 <.0001 288	0.05017 0.3963 288	-0.13205 0.0250 288	-0.16838 0.0042 288
pHK	-0.14887 0.0114 288	0.00693 0.9068 288	-0.30176 <.0001 288	0.05135 0.3886 284	0.54498 <.0001 288	1.00000 288	-0.05713 0.3340 288	-0.19850 0.0007 288	-0.11684 0.0476 288
CE	-0.50269 <.0001 288	-0.03188 0.5900 288	-0.10489 0.0755 288	0.12428 0.0363 284	0.05017 0.3963 288	-0.05713 0.3340 288	1.00000 288	0.18321 0.0018 288	0.06772 0.2520 288
DA	-0.27775 <.0001 288	0.02989 0.6135 288	-0.00708 0.9048 288	-0.12649 0.0331 284	-0.13205 0.0250 288	-0.19850 0.0007 288	0.18321 0.0018 288	1.00000 288	0.26088 <.0001 288
DR	0.06272 0.2887 288	-0.14823 0.0118 288	0.28828 <.0001 288	-0.06638 0.2648 284	-0.16838 0.0042 288	-0.11684 0.0476 288	0.06772 0.2520 288	0.26088 <.0001 288	1.00000 288
POR	0.28446 <.0001 288	-0.11616 0.0489 288	0.23314 <.0001 288	0.08278 0.1642 284	0.00212 0.9715 288	0.06437 0.2763 288	-0.11576 0.0497 288	-0.69385 <.0001 288	0.45192 <.0001 288
HUM	0.31736 <.0001 288	-0.18237 0.0019 288	0.19035 0.0012 288	0.21816 0.0002 284	-0.08086 0.1712 288	0.09987 0.0907 288	-0.24552 <.0001 288	-0.11921 0.0432 288	-0.00816 0.8903 288
MOS	0.11599 0.0492 288	-0.43265 <.0001 288	0.09880 0.0942 288	0.33414 <.0001 284	-0.35466 <.0001 288	-0.11824 0.0450 288	-0.09310 0.1149 288	0.04725 0.4244 288	0.11444 0.0524 288
arci	0.08419 0.1541 288	0.04310 0.4663 288	-0.11212 0.0574 288	-0.10698 0.0719 284	0.37503 <.0001 288	0.29749 <.0001 288	-0.26691 <.0001 288	-0.23653 <.0001 288	-0.20241 0.0005 288
lim	0.03173 0.5918 288	0.00591 0.9205 288	-0.07038 0.2338 288	-0.11550 0.0518 284	0.26365 <.0001 288	0.19538 0.0009 288	-0.15039 0.0106 288	-0.25681 <.0001 288	-0.27382 <.0001 288
are	-0.06312 0.2857 288	-0.02542 0.6675 288	0.10281 0.0815 288	0.12968 0.0289 284	-0.36273 <.0001 288	-0.27855 <.0001 288	0.23331 <.0001 288	0.28914 <.0001 288	0.28348 <.0001 288
	ANP	US	Si	Alt	pHa	pHK	CE	DA	DR
Ns	0.41097 <.0001 288	-0.21515 0.0002 288	0.16956 0.0039 288	0.21553 0.0003 284	-0.33993 <.0001 288	-0.10098 0.0872 288	-0.25279 <.0001 288	-0.19945 0.0007 288	-0.06210 0.2936 288
AU	-0.17285 0.0033 288	-0.18158 0.0020 288	-0.27961 <.0001 288	0.07679 0.1970 284	0.45153 <.0001 288	0.17176 0.0035 288	-0.07489 0.2051 288	0.06450 0.2753 288	-0.03423 0.5628 288
Nfo1	0.40557 <.0001 288	-0.16008 0.0065 288	0.29857 <.0001 288	0.13546 0.0224 284	-0.07847 0.1842 288	0.07070 0.2316 288	-0.15352 0.0091 288	-0.00433 0.9417 288	-0.06691 0.2577 288
	POR	HUM	MOS	arci	lim	are	Ns	AU	Nfo1
ANP	0.28446 <.0001 288	0.31736 <.0001 288	0.11599 0.0492 288	0.08419 0.1541 288	0.03173 0.5918 288	-0.06312 0.2857 288	0.41097 <.0001 288	-0.17285 0.0033 288	0.40557 <.0001 288
US	-0.11616 0.0489 288	-0.18237 0.0019 288	-0.43265 <.0001 288	0.04310 0.4663 288	0.00591 0.9205 288	-0.02542 0.6675 288	-0.21515 0.0002 288	-0.18158 0.0020 288	-0.16008 0.0065 288
Si	0.23314 <.0001	0.19035 0.0012	0.09880 0.0942	-0.11212 0.0574	-0.07038 0.2338	0.10281 0.0815	0.16956 0.0039	-0.27961 <.0001	0.29857 <.0001

	288	288	288	288	288	288	288	288	288
Alt	0.08278 0.1642 284	0.21816 0.0002 284	0.33414 <.0001 284	-0.10698 0.0719 284	-0.11550 0.0518 284	0.12968 0.0289 284	0.21553 0.0003 284	0.07679 0.1970 284	0.13546 0.0224 284
pHa	0.00212 0.9715 288	-0.08086 0.1712 288	-0.35466 <.0001 288	0.37503 <.0001 288	0.26365 <.0001 288	-0.36273 <.0001 288	-0.33993 <.0001 288	0.45153 <.0001 288	-0.07847 0.1842 288
pHK	0.06437 0.2763 288	0.09987 0.0907 288	-0.11824 0.0450 288	0.29749 <.0001 288	0.19538 0.0009 288	-0.27855 <.0001 288	-0.10098 0.0872 288	0.17176 0.0035 288	0.07070 0.2316 288
CE	-0.11576 0.0497 288	-0.24552 <.0001 288	-0.09310 0.1149 288	-0.26691 <.0001 288	-0.15039 0.0106 288	0.23331 <.0001 288	-0.25279 <.0001 288	-0.07489 0.2051 288	-0.15352 0.0091 288
	POR	HUM	MOS	arci	lim	are	Ns	AU	Nfo1
DA	-0.69385 <.0001 288	-0.11921 0.0432 288	0.04725 0.4244 288	-0.23653 <.0001 288	-0.25681 <.0001 288	0.28914 <.0001 288	-0.19945 0.0007 288	0.06450 0.2753 288	-0.00433 0.9417 288
DR	0.45192 <.0001 288	-0.00816 0.8903 288	0.11444 0.0524 288	-0.20241 0.0005 288	-0.27382 <.0001 288	0.28348 <.0001 288	-0.06210 0.2936 288	-0.03423 0.5628 288	-0.06691 0.2577 288
POR	1.00000 288	0.12239 0.0379 288	0.03139 0.5957 288	0.07162 0.2256 288	0.06416 0.2778 288	-0.07848 0.1841 288	0.17832 0.0024 288	-0.05591 0.3444 288	0.01936 0.7435 288
HUM	0.12239 0.0379 288	1.00000 288	0.22731 <.0001 288	0.06608 0.2637 288	0.05992 0.3109 288	-0.07289 0.2175 288	0.47948 <.0001 288	0.15923 0.0068 288	0.56367 <.0001 288
MOS	0.03139 0.5957 288	0.22731 <.0001 288	1.00000 288	-0.10394 0.0782 288	-0.11496 0.0513 288	0.12847 0.0293 288	0.44432 <.0001 288	-0.01650 0.7804 288	0.01631 0.7829 288
arci	0.07162 0.2256 288	0.06608 0.2637 288	-0.10394 0.0782 288	1.00000 288	0.46173 <.0001 288	-0.80630 <.0001 288	-0.11895 0.0437 288	0.39436 <.0001 288	0.00621 0.9164 288
lim	0.06416 0.2778 288	0.05992 0.3109 288	-0.11496 0.0513 288	0.46173 <.0001 288	1.00000 288	-0.89698 <.0001 288	0.08999 0.1276 288	0.16331 0.0055 288	0.15319 0.0092 288
are	-0.07848 0.1841 288	-0.07289 0.2175 288	0.12847 0.0293 288	-0.80630 <.0001 288	-0.89698 <.0001 288	1.00000 288	-0.00073 0.9902 288	-0.30545 <.0001 288	-0.10525 0.0745 288
Ns	0.17832 0.0024 288	0.47948 <.0001 288	0.44432 <.0001 288	-0.11895 0.0437 288	0.08999 0.1276 288	-0.00073 0.9902 288	1.00000 288	-0.03883 0.5116 288	0.38726 <.0001 288
AU	-0.05591 0.3444 288	0.15923 0.0068 288	-0.01650 0.7804 288	0.39436 <.0001 288	0.16331 0.0055 288	-0.30545 <.0001 288	-0.03883 0.5116 288	1.00000 288	0.22623 0.0001 288
Nfo1	0.01936 0.7435 288	0.56367 <.0001 288	0.01631 0.7829 288	0.00621 0.9164 288	0.15319 0.0092 288	-0.10525 0.0745 288	0.38726 <.0001 288	0.22623 0.0001 288	1.00000 288

Anexo (C) Análisis Estadístico Multivariado

Eigenvalues of the Correlation Matrix

	Autovalor	Diferencia	Proporción	Acumulada
1	3.43175755	0.84006601	0.2288	0.2288
2	2.59169154	0.88999982	0.1728	0.4016
3	1.70169173	0.26545601	0.1134	0.5150
4	1.43623572	0.21578924	0.0957	0.6108
5	1.22044648	0.16182581	0.0814	0.6921
6	1.05862068	0.16103314	0.0706	0.7627
7	0.89758753	0.14817819	0.0598	0.8225
8	0.74940934	0.21988235	0.0500	0.8725
9	0.52952700	0.08613233	0.0353	0.9078
10	0.44339466	0.08754787	0.0296	0.9374
11	0.35584679	0.03913974	0.0237	0.9611
12	0.31670706	0.08458267	0.0211	0.9822
13	0.23212438	0.19716485	0.0155	0.9977
14	0.03495953	0.03495953	0.0023	1.0000
15	0.00000000		0.0000	1.0000

Sistema SAS

The PRINCOMP Procedure

EigenVectors

	Prin1	Prin2	Prin3	Prin4	Prin5	Prin6	Prin7	Prin8
Alt	-.061633	0.241474	0.069629	0.380222	-.469999	0.304466	0.103808	-.135804
pHa	0.333279	-.257256	0.014047	0.392460	-.070265	-.075284	-.105372	0.025311
pHK	0.274915	-.048181	-.026125	0.388434	-.161220	-.171637	-.324829	0.622670
CE	-.144066	-.240673	0.023368	0.250538	-.291352	0.075647	0.698214	0.144148
DA	-.223802	-.223917	0.508437	-.014122	0.319959	0.149698	0.042710	0.286886
DR	-.203721	0.009758	-.280653	0.263531	0.613227	0.209476	0.166109	0.283394
POR	0.064837	0.234103	-.646339	0.202653	0.161784	0.000532	0.138275	-.094951
HUM	0.061263	0.447818	0.201285	0.187940	0.126712	-.234167	-.008380	0.076889
MOS	-.147843	0.335459	0.086859	0.002937	-.093618	0.611996	-.191533	0.252031
arci	0.443895	-.006089	0.014265	-.052459	0.146882	0.283807	-.121273	-.102864
lim	0.403562	0.062196	0.005628	-.314717	-.032899	0.084195	0.400495	0.258492
are	-.488195	-.037967	-.010848	0.233773	-.051791	-.197508	-.203418	-.118990
Ns	-.061772	0.513331	0.058224	-.139171	-.080092	-.019077	0.015608	0.100123
AU	0.240450	-.009225	0.298494	0.379548	0.263951	0.257359	0.029262	-.478785
Nfol	0.086704	0.358067	0.312723	0.147767	0.180131	-.421362	0.286759	-.023218

EigenVectors

	Prin9	Prin10	Prin11	Prin12	Prin13	Prin14	Prin15
Alt	-.639911	0.062255	-.034446	0.174043	-.026527	-.010673	0.000000
pHa	0.143279	0.120622	0.545087	0.298298	0.473350	-.030548	0.000000
pHK	0.047894	0.110238	-.327809	-.100475	-.297057	0.040123	0.000000
CE	0.386510	-.278758	-.174847	-.005424	0.037100	-.006581	0.000000
DA	-.182766	0.024197	0.013605	0.222123	0.029541	0.589721	0.000000
DR	-.183528	0.035409	0.010515	0.147324	-.004331	-.474958	0.000000
POR	0.037492	0.058720	0.005461	-.044366	0.029885	0.648162	0.000000
HUM	-.018446	-.687337	0.362560	-.051603	-.188848	0.021160	0.000000
MOS	0.299592	0.069537	0.162555	-.419408	0.278300	0.013433	0.000000
arci	-.028759	-.405714	-.473860	0.162432	0.328118	0.000730	0.385404
lim	-.135734	0.228105	0.323269	-.085437	-.241741	-.008492	0.507973
are	0.103893	0.052564	0.023906	-.024927	-.004751	0.005234	0.770343
Ns	0.374451	0.205581	-.111117	0.702041	-.063092	-.034693	0.000000
AU	0.286451	0.223286	-.023969	-.079707	-.451752	-.005433	0.000000
Nfol	-.086025	0.312477	-.250850	-.292414	0.443323	-.043224	0.000000