



---

---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA

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

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

BIÓLOGA

P R E S E N T A

MARÍA DEL SOCORRO GARCÍA HERNÁNDEZ

DIRECTOR: DR. GERARDO CRUZ FLORES

MÉXICO, D.F.

NOVIEMBRE DE 2004



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## DEDICATORIA

*Si pienso y luego existo, pensaré hasta el último amanecer en ustedes que brindan amor, amor perfecto, amor exacto, amor hermoso.*

*La filosofía de mi vida ha sido escrita por sus manos.*

*Si existo y luego pienso, para mí ustedes son la vida, son la mente que ha pensado, que ha creado. Con ustedes no hay leyes, ni lógica que logre condicionar; solo hay un sentimiento que es implasmable en un papel y que se resume en un "yo los quiero, yo los amo, como se ama la vida misma".*

*Creo que resulta más fácil decir cuanto los necesito, cuanto admiro su amistad; creo que un hombre sin familia es un hombre castigado, por ello no deseo jamás que la vida me castigue.*

*Los amo en demasía, los necesito día a día.*

*A USTEDES MI FAMILIA.*

A TI MAMI, base fundamental de esta familia, a ti ejemplo de lucha constante, de entereza. A ti por tenerme paciencia, por ser mi consejera, por ser sincera, por ser mi amiga. Gracias por que siempre con tus palabras dulces alientas mis días.

A MIS HERMANOS: HORTENSIA, LOURDES, PILAR, ERASMO Y CLAUDIA. A ustedes por el ejemplo con el que aprendí a andar. Por la confianza depositada y el gran amor que me han dado, y que con todo lo bueno y lo malo siempre ha perdurado. Gracias por que con ustedes he aprendido que lo que verdaderamente cuenta en la vida, no son las cosas que tengo alrededor, sino las personas que tengo alrededor.

A MIS SOBRINOS: NELLY, RICARDO, CLAUDIA, MONSERAT, OMAR, MARTÍN, CHUY, ANDRÉS Y DIEGO. A ustedes que vienen y que irán dejando en su camino tanto amor como el que ahora reciben; ustedes representan el amor eterno. Espero que algún día ustedes me dediquen su trabajo de tesis.

Y a este otro amor que es un descuido que me da cuidado, que me da su mano. A este amor superado, que comparte lo bueno y lo malo, y que a diario cultivamos. A este amor con caminos diferentes pero juntos, siempre librando obstáculos, a ti que has pasado a ser parte importante de mi vida. A quien quiero, a quien amo, ATI OSWALD.

## AGRADECIMIENTOS.

A la máxima casa de estudios: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, carrera de Biología, por haberme albergado en sus filas y darme la oportunidad de cumplir mi más deseada meta. Gracias a todos mis profesores por la formación recibida.

Al Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal, al Dr. Gerardo Cruz Flores, por haber permitido que bajo su tutela llevara a cabo este proyecto; por sus grandes enseñanzas, académicas y humanas; por su apoyo incondicional a pesar de los errores propios cometidos, por la paciencia, la confianza, y sobre todo, por su invaluable amistad. Reciba mi reconocimiento y gratitud.

A quienes en el desarrollo del presente trabajo contribuyeron con ideas, opiniones, asesorías de campo, de gabinete, ayuda técnica y a quienes proporcionaron material: al M. en C. Efraín Ángeles Cervantes, al M. en C. Armando Cervantes Sandoval del Laboratorio de Aplicaciones computacionales, a la M. en C. Lourdes Castillo Granada del Laboratorio de Absorción Atómica y al M. en C. Eliseo castellano de Rosas del Laboratorio de Geomática.

A los miembros del jurado: M. en C. Rosalva García Sánchez, M. en C. Armando Cervantes Sandoval, Dr. Gerardo Cruz Flores, Dr. Isaías Salgado Ugarte y M. en C. Efraín Ángeles Cervantes, por sus excelentes comentarios que permitieron enriquecer el presente trabajo

Al profesor Ramiro Ríos Gómez, por que tuve la oportunidad de conocerlo y gracias a ello dirigí mis pasos hacia la edafología y al M. en C Efraín Ángeles Cervantes por el apoyo académico, la confianza depositada y la amistad brindada.

A los compañeros del laboratorio, con los que pase excepcionales momentos de alegría, tristeza, enfados, aventuras, y muy especialmente a Rosario por que más que compañera eres amiga, por todos los inolvidables momentos, eres especial.

A Lucia Bailón Lira, amiga desafortunadamente no quisiste seguir probando las mieles de la biología, pero ello no impidió contar con tu amistad incondicional y que siguieras acompañándome en el camino, por ello gracias.



**CONTENIDO.**

INDICE DE CUADROS Y FIGURAS	iii
RESUMEN	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Suelo: definición	4
2.1.1 Funciones del suelo	5
2.1.2 Suelos forestales	6
2.2 CALIDAD DEL SUELO	8
2.2.1 Evaluación de calidad de suelo: indicadores de calidad del suelo	9
2.3 RELACIÓN SUELO-PLANTA	11
2.4. PROPIEDADES EDÁFICAS	11
2.4.1 Propiedades físicas	11
2.4.2 Propiedades químicas	13
2.4.3 Propiedades biológicas	20
2.4.4 Propiedades bioquímicas	21
2.5 BOSQUE DE <i>Abies religiosa</i> (H.B.K) Schtl et Cham	22
2.5.1 Taxonomía	23
2.5.2 Nombre(s) común(es)	23
2.5.3 Forma biológica: descripción	23
2.5.4 Distribución en México	24
2.5.5 Requerimientos ambientales	24
2.5.6 Usos	25
2.6. ANÁLISIS MULTIVARIADO	26
2.6.1 Análisis de Componentes Principales (ACP)	26
2.6.2 Análisis por agrupación: Análisis Cluster	28
3. PROBLEMÁTICA	29
3.1 Antecedentes	29
3.2 Justificación	29
4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	31

---

4.1 Hipótesis	31
4.2 Objetivos	31
5. MATERIALES Y MÉTODOS	32
5.1 ZONA DE ESTUDIO: Parque Nacional Iztaccíhuatl y Popocatepetl	32
5.1.1 Delimitación de la zona de estudio	34
5.1.2 Sitio: punto de muestreo	34
5.2 TOMA DE MUESTRAS	36
5.2.1 Muestras de suelo	36
5.2.2 Muestras de Mantillo	36
5.2.3 Muestras foliares	37
5.3 ANÁLISIS DE LABORATORIO	38
5.3.1 Pretratamiento de muestras	38
5.3.2 Análisis de las propiedades físicas del suelo	38
5.3.3 análisis de las propiedades químicas del suelo	39
5.3.4 Análisis biológico y bioquímicos del suelo	39
5.3.5 Análisis químico de mantillo y tejido vegetal	40
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
6.1. Descripción de los sitios de estudio	42
6.2 Indicadores físicos de calidad del suelo	44
6.3 Indicadores químicos de calidad del suelo	48
6.4 Indicadores biológicos de calidad del suelo	53
6.5 Indicadores bioquímicos de la calidad de suelo	56
6.6 Índice total de calidad de suelo	61
6.7 Estado nutrimental de <i>Abies religiosa</i>	64
6.8 Reserva nutrimental en mantillo	68
7. CONCLUSIONES	71
8. COMENTARIOS Y SUGERENCIAS	73
9. LITERATURA CITADA	
10. APENDICE	

## INDICE DE CUADROS Y FIGURAS.

INDICE DE CUADROS

CUADRO		Página
Cuadro 1.	Clasificación de organismos del suelo con base al tamaño de su cuerpo	6
Cuadro 2.	Propiedades químicas del suelo que han sido utilizadas o propuestas como indicadores de calidad del suelo.	10
Cuadro 3	Elementos esenciales en la nutrición vegetal.	16
Cuadro 4	Nombres comunes de la especie <i>A. religiosa</i> .	23
Cuadro 5	Descripción de las características generales de los sitios muestreados.	42
Cuadro 6	Propiedades físicas de los suelos para cada sitio de estudio.	44
Cuadro 7	CP de los parámetros físicos	45
Cuadro 8	Índice físico de la calidad de suelo (IFCS).	47
Cuadro 9	Propiedades químicas de los suelos en cada sitio de estudio.	49
Cuadro 10	CP de los parámetros químicos.	50
Cuadro 11	Índice químico de calidad de suelo (IQCS).	52
Cuadro 12	Propiedades biológicas de los suelos en cada sitio de estudio	54
Cuadro 13	CP de los parámetros biológicos	55
Cuadro 14	Índice biológico de calidad de suelo (IBCS).	56
Cuadro 15	Propiedades bioquímicas de los suelos en cada sitio de estudio	57
Cuadro 16	CP de los parámetros bioquímicos	60
Cuadro 17	Índice bioquímico de Calidad de Suelo (IBQCS)	61
Cuadro 18	Resultados del AEMV en datos estandarizados de los grupos de propiedades del suelo	62
Cuadro 19	Índice de calidad del suelo total para cada sitio de estudio.	63
Cuadro 20	Estado nutrimental de tejido foliar en <i>Abies religiosa</i> en la exposición occidente del área de influencia del PN Izta-Popo.	65
Cuadro 21	Estado nutricional de brinzales y adultos de <i>Abies religiosa</i> y <i>Abies balsamea</i> .	66
Cuadro 22	Concentración y contenido de la reserva nutrimental en mantillo.	68
Cuadro 22a	Relación de nutrimentos en mantillo	69

**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>FIGURA</b>		<b>Página</b>
Figura 1.	Proceso para evaluar calidad del suelo (Tomado de USDA-NRCS, 1998).	2
Figura 2.	El suelo: sistema vivo y dinámico, sostén de especies vegetales y animales que en él se establecen	4
Figura 3.	Mineralización y destino de los nutrimentos inorgánicos.	7
Figura 4.	Influencia del pH sobre la disponibilidad de nutrimentos para las plantas.	13
Figura 5.	Conos resinosos de <i>A. religiosa</i>	24
Figura 6.	a) Imagen satelital del macizo volcánico Iztaccíhuatl y Popocatepetl; b) Unidades ambientales y puntos de muestreo	35
Figura 7.	a) muestra de suelo de 0-20 cm de profundidad para análisis físico y químico; b) frascos de plástico conteniendo muestra de suelo de 0-10 cm de profundidad para análisis biológico y bioquímico; c) medición del cuadrante para obtener muestra de mantillo; d) ramilla de <i>Abies religiosa</i> seleccionada como muestra foliar	37
Figura 8.	Análisis de laboratorio; a) espectroscopio de absorción atómica utilizado para cuantificar cationes intercambiables; b) Frascos en incubación, divididos en suelo natural y suelo fumigado para determinar evolución de CO <sub>2</sub> y calcular el carbono en la biomasa microbiana (CBM)	39
Figura 9.	Distribución de <i>Abies religiosa</i> y suelos en la exposición occidente del Izta-Popo.	43
Figura 10.	Dispersión de CP físicos.	45
Figura 11.	Similitud entre sitios de acuerdo a sus atributos físicos.	47
Figura 12.	Dispersión de los CP químicos.	50
Figura 13.	Similitud entre sitios de acuerdo a sus atributos químicos.	52
Figura 14.	Tipo de colonia bacteriana, presente en la mayoría de las unidades ambientales estudiadas.	53
Figura 15.	Dispersión de CP biológicos.	55
Figura 16.	Similitud entre sitios de acuerdo a sus atributos biológicos	56
Figura 17.	Evolución de CO <sub>2</sub> determinada mediante titulación del KOH con HCl.	57
Figura 18.	Relación entre la producción de CO <sub>2</sub> y el CBM edáfico	58
Figura 19.	Relación entre fósforo disponible y actividad fosfatásica ácida.	59
Figura 20.	Dispersión de los componentes principales bioquímicos.	60
Figura 21.	Similitud de los sitios de acuerdo a sus propiedades bioquímicas.	61

## RESUMEN.

Con el objetivo de determinar, mediante análisis físicos, químicos, biológicos y bioquímicos, los indicadores de calidad edáfica y obtener un índice de calidad total y su relación con el estado nutrimental de *Abies religiosa*, se realizó esta investigación que evaluó propiedades de los suelos del área de influencia del Parque Nacional Iztaccihuatl y Popocatepetl, en su exposición occidente.

Con ayuda de fotografías aéreas se ubicaron 15 unidades ambientales. En sitios representativos, se obtuvieron muestras compuestas de suelo (0-20 y 0-10 cm de profundidad), de mantillo y de tejido vegetal, colectadas durante los meses de junio de 2001 y marzo de 2002.

A los resultados del análisis de propiedades edáficas se les realizó un análisis estadístico multivariado (AEMV): de componentes principales (CP) y cluster (CT). Del análisis de CP, se encontró que de 26 propiedades edáficas, sólo 10 de estas (arena, conductividad eléctrica, % humedad, pH, MOS,  $N_{total}$ , hongos, bacterias, Fosfatasa<sub>ácida</sub> y  $CO_2$ ), son variables robustas (VR) y se proponen como indicadoras de calidad en suelos similares a los aquí estudiados.

Con apoyo de los CP, se obtuvieron Índices de Calidad de Suelo (ICS) parciales para cada grupo de propiedades edáficas y mediante la sumatoria de ellos, se obtuvo el índice de calidad de suelo total ( $ICS_{total}$ ) para cada unidad ambiental estudiada.

La unidad ambiental O1 (Cañada la Calzada) presentó el mayor valor de  $ICS_{total}$ . El menor valor de  $ICS_{total}$  fue para F11 (Cañada Amalacaxco)

Para el estado nutrimental de *Abies religiosa* se encontró que el % de N, P y Mg foliar están en la clase de nivel nutrimental bajo, el Ca y K se encontraron en el nivel nutrimental alto. Las concentraciones de N, P y K foliar tienen correspondencia con el  $ICS_{total}$ .

La reserva de nutrimentos en mantillo se encuentra para N en promedio  $1.80 t ha^{-1}$ . En referencia al P, el promedio encontrado fue de  $0.08 t ha^{-1}$  ( $80 kg ha^{-1}$ ). El K en promedio presentó  $0.23 t ha^{-1}$ . Ca se encontró con promedio alrededor de 8% ( $12.8 t ha^{-1}$ ). El Mg se encontró en  $0.45 t ha^{-1}$ . La unidad ambiental O13 (parte media de la Cañada Amalacaxco) fue la que mayor reserva de nutrimentos en mantillo tuvo.

**Palabras clave:** Parque Nacional, Indicadores de calidad, Índice de calidad, *Abies religiosa*, estado nutrimental.

## SUMMARY.

In order to determine, with the help of physical, chemical, biological and biochemical analysis, the soil quality indicators and obtain index of total quality and their relationship with the nutritional state of *Abies religiosa*, was carried out this investigation for evaluating soils properties in the area of influence of National Park Iztaccihuatl and Popocatepetl, in their exhibition occident.

With the use of air photographs were defined 15 environmental units. In representative places were taken samples composed of soils (0-20 and 0-10 cm of depth) besides humus and tissue vegetable, that were collected from June 2001 to March 2002.

The results of soils properties analysis were carried out by statistical multivariate analysis (SMA): principal components (PC) and clustering (CT). PC analysis, showed that from 26 soil properties, only 10 (sand, electric conductivity, % humidity, pH, MOS, N<sub>total</sub>, fungal and bacterias, acid phosphatase and CO<sub>2</sub>), were robust variable (RV) and have been proposed as indicators of soil quality in soils similar to those here studied.

With support of PC, partial soil quality indexes (pSCI) were obtained for each group of soil properties, using its sumatoria were obtained the total soil quality index (tSQI) for each environmental unit studied.

The environmental unit O1 (Cañada La Calzada) presented the biggest value in tSQI, the smallest value in tSQI was for F11 (Cañada Amalacaxco).

In nutritional state of *Abies religiosa* was found that the % N, P and Mg foliate is in low range of nutritional level, the Ca and K were found in high nutritional level. The concentrations of N, P and K foliate has correspondence with the tSQI,

The nutrients reserve in the humus was for N, 1.80 t ha<sup>-1</sup> average. In reference to P, was 0.08 t ha<sup>-1</sup> average (80 kg ha<sup>-1</sup>). K presented 0.23 t ha<sup>-1</sup> average. Ca around 8% average (12.8 t ha<sup>-1</sup>). The Mg was 0.45 t ha<sup>-1</sup>.

The environmental unit O13 (in the middle of the Cañada Amalacaxco) wich had one of the bigger reserve of nutriment in the humus.

**Key words:** National Park, quality indicators, quality Index, *Abies religiosa*, nutritional state.

## 1. INTRODUCCION.

El suelo es un sistema vivo, con procesos dinámicos complejos, parte importante de los ecosistemas; compuesto de tres fases: sólida, líquida y gaseosa (Etchevers *et al.*, 2000).

El suelo es uno de los recursos naturales más importantes para el 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 (Aguilar, 1995).

Como consecuencia de las actividades antropogénicas los suelos sufren procesos de degradación en mayor o menor escala. La degradación de ellos puede interpretarse como una pérdida significativa de calidad.

A diferencia del agua y aire, los cuales poseen estándares de calidad bien definidos, la calidad del suelo es difícil de definir y cuantificar.

La evaluación de la calidad del suelo, o su interpretación, se realiza con base a las funciones y los cambios que en ellas se produzcan en respuesta a estrés natural o introducido (USDA, 1998).

Una secuencia de cómo evaluar la calidad de suelo es:

- ✓ Definir las funciones del suelo en cuestión.
- ✓ Identificar procesos edáficos específicos asociados a sus funciones
- ✓ Identificar propiedades del suelo e indicadores que sean suficientemente sensibles para detectar cambios en las funciones o procesos del suelo de nuestro interés (Carter *et al.*, 1997 en USDA, 1998).

Con la evaluación de los indicadores edáficos, a corto, mediano y largo plazo, que describen los procesos dinámicos de este, se genera información importante y útil para conocer las tendencias tanto de los procesos de degradación edáfica, como las de la vegetación que sostiene (Figura 1).

Por otro lado, el estudio nutrimental en el follaje de las especies, refleja el estado de salud de las mismas y ello depende, entre otros factores, de la calidad del suelo que las sostiene y por ende, el estudio de nutrimentos en la biomasa foliar puede ser buen indicador de la calidad edáfica.



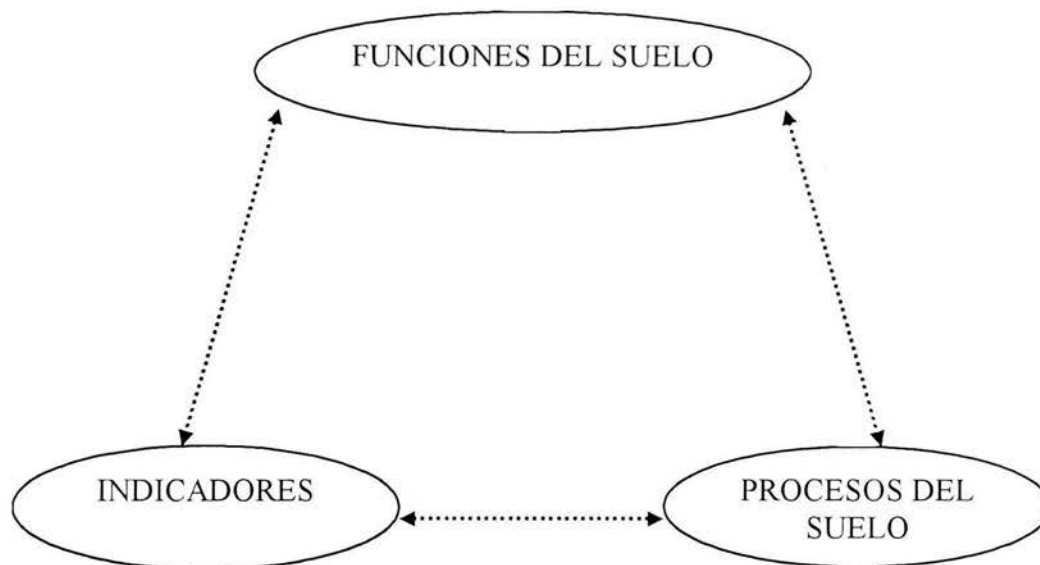


Figura 1. Proceso para evaluar calidad del suelo (Tomado de USDA-NRCS, 1998).

En México, 20.9% de la superficie, esta cubierto de bosques, entre los que destacan los de coníferas y latifoliadas, que ocupan una superficie de 25 millones de hectáreas (SARH, 1992), de las que anualmente se deforestan 341,872 km<sup>2</sup> (SEMARNAT, 2000).

Los beneficios que se obtienen de los bosques mixtos templados y más específicamente de los que se desarrollan en el Eje Neovolcánico, son:

- a) Poseen una gran biodiversidad, así como un alto porcentaje de especies endémicas (Rzedowski, 1978 y Toledo, 1988 citados por Ángeles, 1998).
- b) Juegan un papel importante en la captación de humedad y en el mantenimiento de los cuerpos acuáticos y mantos freáticos, lo que favorece las actividades de los principales centros de población del país (Guadalajara, Morelia, Toluca, Cuernavaca, Distrito Federal, Puebla, Tlaxcala, Jalapa y Colima).
- c) Constituyen el pilar más fuerte de la industria forestal del país y aportan leña, base energética del medio rural. Además proporcionan sitios de recreación, esparcimiento y belleza escénica y protegen a los otros recursos como el suelo, la flora y la fauna (Ángeles, 1998).

La especie *Abies religiosa* (H.B. K) Schtl. et Cham., es un componente importante de los bosques mixtos mexicanos y se calcula que ocupa una superficie entre 40,000 y 50, 000 hectáreas y se considera que de un 80 a 90% está concesionada para su explotación y de un 10 a un 20 % se encuentran dentro de los Parques Nacionales (Ángeles, 1998).

El Parque Nacional Iztaccíhuatl y Popocatepetl alberga diversos ecosistemas de montaña, uno de ellos el bosque mixto, con valor en sus servicios ambientales y en belleza escénica. Por su localización geográfica es de suma importancia para los pobladores de esta área densamente poblada y la presión que ejercen sobre sus recursos naturales ha causado degradación sobre ellos.

La recuperación y conservación de los ecosistemas y sus recursos naturales, es una preocupación de interés nacional. Por ello, la presente investigación se realizó en la exposición occidente del PN Izta-Popo con el objetivo de contribuir al estudio de los principales indicadores edáficos con los que se pueda proponer un índice de calidad del suelo (ICS) que permita conocer la calidad del suelo en bosques templados.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA.

### 2.1 SUELO: Definición

El suelo es el material no consolidado, mineral u orgánico sobre la superficie de la tierra que ha sido sometido e influenciado por factores genéticos y ambientales: material parental, clima (incluyendo efectos causados por el agua, y la temperatura), macroorganismos, microorganismos y topografía, todos actuando durante el tiempo y produciendo un producto –el suelo- que difiere, del material del cual se derivó, en muchas características y propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas y además es medio natural para el crecimiento de las plantas (SSS, 1999).

Por otro lado, según Etchevers *et al.*, (2000), el suelo es un cuerpo natural, dinámico, vivo, que juega un papel importante en el ecosistema terrestre, el cual se forma a una tasa de 1cm por cada 100 a 400 años por interacciones del clima, topografía, biota y material parental. Por el tiempo que toma su formación se le puede considerar como un recurso no renovable en la escala humana de tiempo.

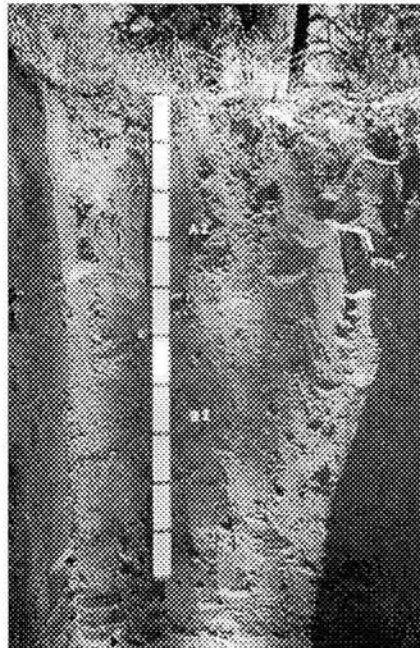


Figura 2. El suelo: sistema vivo y dinámico, sostén de especies vegetales y animales que en él se establecen.

Las definiciones anteriores conducen a saber cuál es la composición del suelo. El suelo se encuentra constituido de partículas sólidas entre las cuales existe un espacio poroso que contiene gases y agua. Este arreglo de partículas sólidas y espacio poroso es llamado matriz del suelo o sistema trifásico de sólido, líquido y gas (Figura 2). El estado ideal del sistema suelo

se considera es 50% de material sólido (45% de partículas minerales y 5% de materia orgánica), el 25% de agua y 25% de gas (Sumner, 2000). Entre las fases sólida, líquida y gaseosa existe un continuo intercambio de moléculas y iones que esta medido por procesos químicos, físicos y biológicos (Doran y Parkin, 1994).

### 2.1.1 Funciones del suelo.

Hoy se reconoce que el suelo cumple cinco funciones vitales para el ecosistema.

1. Proporciona un ambiente físico, químico y biológico para los organismos vivos
2. Regula el flujo de agua, almacena y recicla nutrimentos y otros elementos.
3. Contribuye y apoya la actividad biológica, el crecimiento y diversidad de plantas y la productividad animal.
4. Filtra, degrada e inmoviliza sustancias tóxicas orgánicas e inorgánicas
5. Provee el soporte mecánico a los organismos (Nortcliff, 2002 y USDA, 2001).

En los suelos el agua drena por gravedad, con mayor o menor facilidad de acuerdo al espacio poroso que presenten, de modo que representan una fase de paso importante en el ciclo del agua. Según sus características órgano-minerales retiene o libera compuestos lo que le permite actuar como un filtro natural. También retiene agua por capilaridad lo que posibilita la existencia de pequeños organismos acuáticos.

Desde un punto de vista ecológico, el suelo es el subsistema de los ecosistemas terrestres en donde se realiza principalmente el proceso de descomposición, fundamental para la reobtención y reciclado de nutrimentos que aseguren el otro gran proceso vital: la producción primaria neta, que se manifiesta para nosotros claramente en el subsistema epígeo.

Por otra parte, desde un punto de vista ecológico más amplio, el suelo sirve de refugio a gran cantidad de especies que se ocultan en el anonimato en sus poros y oquedades. La diversidad biológica del suelo es muy alta e incluye desde bacterias hasta pequeños vertebrados (Salazar, 2001).

El Cuadro 1 muestra el tamaño aproximado de los diferentes grupos de organismos del suelo que constituyen la micro y macro flora y fauna y que con base en su nicho ecológico determinan y dan continuidad a los procesos biológicos que participan en los ciclos de nutrimentos y en procesos de edafogénesis, como la agregación de partículas (Smith *et al.*, 1993).

Cuadro 1. Clasificación de organismos del suelo con base al tamaño de su cuerpo (Tomado de Smith *et al.*, 1979 citados en Linden *et al.*, 1994).

Microflora y microfauna	Mesofauna	Macro y megafauna	
100 $\mu\text{m}$		2 mm      20 mm	
Bacterias			
Hongos			
Nematodos			
Rotíferos			
Acaros			
	Colembolos		
	Protura		
	Diplura		
	Symphyla		
	Enchytraeidae		
	Cheloni		
	Isoptera		
		Opiliones	
		Isopoda	
		Amphipoda	
		Chilopoda	
		Diplopoda	
		Megadrili	
		Coleoptera	
		Araneidea	
		Mollusca	
1	128	2      20	
$\mu\text{m}$		$\text{mm}$	
Tamaño del cuerpo			

### 2.1.2 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 (Figura 3) (Pritchett, 1991 y Honorato, 2000).

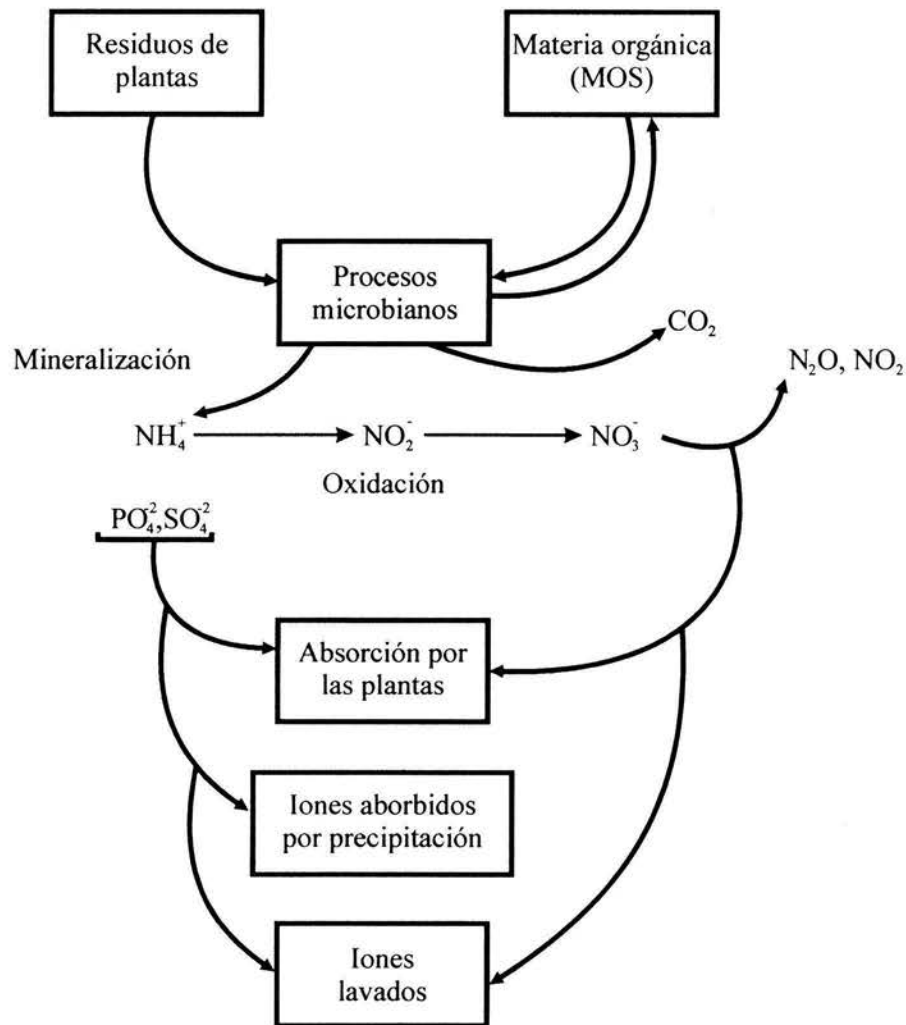


Figura 3. Mineralización y destino de los nutrientes inorgánicos (Tomado de Smith *et al.*, 1993)

En un sentido más amplio, se considera que un suelo forestal es aquel suelo que se ha desarrollado bajo la influencia de una cubierta forestal (Führer, 2000). Aun cuando existen diferentes tipos de suelo, estos tienen un proceso complejo de formación y funcionan siempre bajo las mismas leyes naturales. El suelo sigue manteniendo su plan de organización interno y refleja ahora, la intervención humana. Los cambios del ambiente físico-químico producto de la actividad humana afectan directamente el hábitat edáfico (Aguilar, 1995).

Como consecuencia de las acciones del hombre, el 46% de los suelos de cultivo soportan una degradación moderada; en el 15%, la degradación es muy importante y un 9% se encuentra completamente degradado. El 23% de los suelos europeos se encuentran degradados ya sea química, física o biológicamente (Bouma, 1997 citado por Cruz *et al.*, 2002). La degradación puede interpretarse como una pérdida significativa de la calidad del suelo.

En México, la calidad del suelo se ve amenazada principalmente por el manejo inadecuado en ciertas prácticas productivas de los sectores forestal, ganadero y agrícola; 50% del territorio se dedica al uso ganadero, y en conjunto el 75% de la degradación de los suelos es causada por deforestación, el sobrepastoreo y el cambio de uso de suelo. En la evaluación de la degradación del suelo, se identificó a la deforestación (eliminación de la vegetación arbórea) como una de las actividades que más influyen en la degradación edáfica con el 25.81 % del total (SEMARNAT, 2000) (APENDICE 1)

## 2.2 CALIDAD DEL SUELO.

El concepto calidad de suelo se desarrolló en los años 90'; en la actualidad es aceptado internacionalmente por la ciencia edafológica y tiene como base dos factores: 1) sus propiedades inherentes y dinámicas y, 2) La evaluación de los procesos físicos, químicos, biológicos y sus interacciones (Douglas *et al.*, 2003)

La calidad inherente del suelo es su capacidad natural para funcionar. Estas características no cambian fácilmente (USDA, 2001).

A diferencia del agua y del aire, los cuales poseen estándares bien definidos, la calidad del suelo es difícil de definir y cuantificar.

Los aspectos que se deben tener en cuenta dentro de la definición de calidad de un suelo, son:

- 1) Productividad: capacidad de un suelo para mantener la producción vegetal y biológica.
- 2) Calidad ambiental: la disposición del suelo para atenuar los efectos de contaminantes y patógenos en el ambiente.
- 3) Relación que existe entre la calidad de un suelo y la salud de flora y fauna (Doran y Parkin, 1994).

La calidad del suelo es definida en gran parte por su función y representa la mezcla e interacción de las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo.

De ésta manera, Doran y Parkin (1994), proponen la siguiente definición: la calidad del suelo es "la capacidad del mismo para funcionar dentro de un ecosistema, sostener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental y promover la salud de la flora, la fauna y



del propio hombre". La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo, contribuyó al desarrollo del concepto de calidad de suelo, cuando en 1994 un comité de 14 personas para que definieran el concepto, es así como Karlen *et al.*, 1997 definen la calidad de suelo como la capacidad de un suelo de funcionar dentro de los límites del ecosistema, sosteniendo la productividad de la flora y la fauna, manteniendo la calidad del aire, el agua y la salud humana. Esta definición la complementa Franzluebbers (2002) citado por Granados (2003); y toma en cuenta el manejo, la estabilización y mejoramiento de las funciones del suelo en los ecosistemas.

### 2.2.1 Evaluación de calidad de suelo: indicadores de calidad del suelo

Al hablar de calidad, se hace necesaria una evaluación de propiedades que la indiquen.

La evaluación de la calidad de suelo se lleva a cabo mediante "indicadores", los cuales conceptualmente, se consideran como síntomas de comportamiento de sistemas complejos y se utilizan como herramienta de diagnóstico del estado fundamental de un sistema. A diferencia de indicadores como los de la salud humana o del estado económico, que son ampliamente comprendidos, los indicadores ambientales, que reflejan la condición y estado del ecosistema, usualmente son definidos con menor rigurosidad y son menos investigados (Cruz *et al.*, 2002).

Por lo tanto, es preciso desarrollar indicadores cuantitativos de calidad: física, química, biológica y ecológica, capaces de mostrar el impacto de un inadecuado manejo del suelo, del avance de la degradación y rehabilitación de suelos y su sustentabilidad (Etchevers *et al.*, 2000). Así, las propiedades o atributos que pueden usarse como indicadores se agrupan en cuatro grandes grupos: indicadores físicos, químicos, biológicos y, visuales (Nortcliff, 2002).

Para Doran y Parkin (1994), las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo para ser consideradas como indicadoras de su calidad deben cubrir una serie de condiciones:

- Ser descriptoras de los procesos del ecosistema
- integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo
- reflejar los atributos de sustentabilidad que se quieren medir
- ser sensitivas a variaciones de clima y manejo
- ser accesibles a muchos usuarios y aplicables a condiciones de campo
- su medición debe ser reproducible
- ser fáciles de entender
- sensibles para detectar cambios en el suelo como resultado de la degradación natural y antropogénica
- ser componentes de una base de datos del suelo ya existentes (de ser posible).

Después del análisis de propiedades físicas, químicas y biológicas para evaluar el estado del suelo, se han propuesto varios conjuntos de indicadores de calidad edáfica. En el Cuadro 2 se presenta una síntesis de algunas de estas propuestas.

Cuadro 2. Propiedades químicas del suelo que han sido utilizadas o propuestas como indicadores de calidad del suelo. (Modificado de Schoenholtz *et al.*, 2000).

Indicador	Referencia	Comentarios
P-extractable	Reganold y Palmer, 1995	Propiedad usada para evaluar diferencias en SQ en diferentes manejo de praderas
P-Bray	Harris <i>et al.</i> , 1996 Aune y Lal, 1997 Granados-Damián, 2003	Relacionado con disponibilidad del nutrimento y productividad de las plantas Relacionado con la disponibilidad de P en diferentes suelos tropicales Relacionado con la disponibilidad del nutrimento para <i>Pinus</i> sp. (P-limitante)
P-Adsorción	Larson y Pierce, 1994	Calculado como función de pedotransferencia (oxalato de Fe y Al extractable)
S-Extractable	Reganold y Palmer, 1995	Propiedad usada para evaluar diferencias en SQ en diferentes manejo de praderas
CIC	Pape ndick, 1991, (citado en Karlen y Stott, 1994) Larson y Pierce, 1994 USDA NRCS (citado en Karlen y Stott, 1994) Reganold y Palmer, 1995	Sugerido como indicador químico de primer orden Calculado como función de pedotransferencia (CO y contenido de arcilla) Propuesto como indicador químico Propiedad usada para evaluar diferencias en SQ en diferentes manejo de praderas
K	Doran y Parkin, 1994	Indicador básico de SQ
K-intercambiable	Harris <i>et al.</i> , 1996 Aune y Lal, 1997	Relacionado con disponibilidad del nutrimento y productividad de las plantas Relacionado con la disponibilidad de K en diferentes suelos tropicales
K, Ca y Mg- Extractables	Reganold y Palmer, 1995 Granados-Damián, 2003	Propiedad usada para evaluar diferencias en SQ en diferentes manejo de pradera Usados para evaluar SQ en bosques bajo <i>Pinus</i> sp (Mg-limitante)
pH	Kiniry <i>et al.</i> , 1983 Papendick, 1991, (citado en Karlen y Stott, 1994) Gale <i>et al.</i> , 1991 Larson y Pierce, 1994 Doran y Parkin, 1994 Burguer <i>et al.</i> , 1994 Reganold y Palmer, 1995 Harris <i>et al.</i> , 1996 Romig <i>et al.</i> , 1996 Aune y Lal, 1997 Granados-Damián, 2003	Asociado al potencial iónico suelos con pH < a 4.4 muy ácidos Sugerido como indicador químico de primer orden Utilizado en trébol blanco (pH óptimo 5.7, lim. inf. 3.0, lim. sup. 8.0) Calculado como función de pedotransferencia, asociado a prof. de enraizamiento Indicador básico de SQ Indicador básico de SQ (curvas de suficiencia de pH, con óptimo en 5.6) Propiedad usada para evaluar diferencias en SQ en diferentes manejo de praderas Disponibilidad de nutrimentos (productividad vegetal y calidad ambiental) "Salud química" de suelos agrícolas (pH subóptimo debajo de 6.0) Relación positiva con productividad en diferentes suelos tropicales Indicador de SQ en suelos forestales bajo <i>Pinus</i> sp
Carbono orgánico y materia orgánica	Larson y Pierce, 1994 Doran y Parkin, 1994 Reganold y Palmer, 1995 Manley <i>et al.</i> , 1995 Harris <i>et al.</i> , 1996 Aune y Lal, 1997 Papendick, 1991, (citado en Karlen y Stott, 1994) Soil Conservation Service, (citado en Karlen y Stott, 1994) Romig <i>et al.</i> , 1996 Brejda <i>et al.</i> , 2000 Perie C. and Munson A. 2000. Granados-Damián, 2003	Asociado a CIC, densidad aparente y retención de agua Indicador básico de SQ Indicador de calidad biológico de calidad del suelo en diferentes manejo de praderas Cambio en la reserva de carbono por pastoreo Disponibilidad de nutrimentos, productividad vegetal y calidad ambiental Correlacionado positivamente con rendimiento de cultivos Sugerido como indicador químico de primer orden Propuesto como indicador químico de SQ Propuesto como indicador de "salud química" de suelos agrícolas Propuesto como indicador químico de SQ Carbono orgánico como indicador de SQ después de aplicación de plaguicidas Usados para evaluar SQ en bosques bajo <i>Pinus</i> sp
N-total, N-orgánico y mineralizable	Reganold y Palmer, 1995 Doran y Parkin, 1994 Manley <i>et al.</i> , 1995 Harris <i>et al.</i> , 1996 Powers <i>et al.</i> , 1998 Perie C. and Munson A. 2000. Giardina <i>et al.</i> , 2001. P. C., G. Ryan M. M. Hubbard and Binkley Granados-Damián, 2003	Propuesto como indicador de "salud química" de suelos agrícolas Indicador básico de SQ Cambio en reserva de N por pastoreo Indicador de biodisponibilidad de NH <sub>4</sub> Productividad vegetal y calidad ambiental Indicador de calidad de suelo Nitrógeno orgánico como indicador de SQ después de aplicación de plaguicidas Tasas de mineralización de N en suelos de diferente textura N-Total, usados para evaluar SQ en bosques bajo <i>Pinus</i> sp
P-Total, P-mineral y P-extractable	Reganold y Palmer, 1995 Burguer <i>et al.</i> , 1994 Doran y Parkin, 1994	Cambio en reserva de P por pastoreo Usado como indicador de calidad ambiental (capacidad de fijación de P al sustrato) Indicador básico de SQ
Saturación de Aluminio	Aune y Lal, 1997	Considerado como el mejor indicador de acidez en suelos tropicales
Conductividad eléctrica	Papendick, 1991, (citado en Karlen y Stott, 1994) Kiniry <i>et al.</i> , 1983 Larson y Pierce, 1994 Doran y Parkin, 1994, Burguer <i>et al.</i> , 1994	Sugerido como indicador básico de SQ Función en pedotransferencia relacionado con productividad vegetal Relacionado como indicador de salinidad de suelos (productividad vegetal) Propiedad química relacionada con SQ

SQ, calidad del suelo; P-extractable, Fósforo extractable; S-Extractable, Azufre extractable; CO, carbono orgánico; CIC, capacidad de intercambio catiónico; K, Ca y Mg- Extractables, K, Ca y Mg extractables

## 2.3 RELACIÓN SUELO-PLANTA.

Las distintas características mineralógicas, físicas, químicas y biológicas de los suelos propiciadas por diversidad de tipos de material parental, diferentes condiciones ambientales y variable tiempo de formación, generan diversos suelos y en ellos una diversidad de tipos de vegetación. Todas las plantas crecen y se reproducen en respuesta a las interacciones siempre cambiantes de su ambiente edáfico, de los factores pH, MOS, CIC, humedad, etc (Cruz, 2000).

El suelo es un medio natural que permite el crecimiento de la plantas. Por medio de sus raíces, las plantas absorben del suelo agua y nutrientes.

Las raíces son un órgano fundamental de las plantas, para anclarse al suelo, absorber agua y nutrientes. Las raíces además, son el órgano desde donde se debe conducir los minerales y agua absorbidos a los sitios de demanda a través de los tejidos conductores y finalmente, no menos importante, son las responsables de formar asociaciones biológicas con microorganismos del suelo para aumentar la obtención de nutrientes poco disponibles en el suelo (Cruz, 2003).

El suelo proporciona un medio adecuado a las raíces para que puedan funcionar. Un buen espacio poroso, oxígeno disponible para la respiración radicular, una buena liberación de bióxido de carbono, abastecimiento de nutrientes y agua, son factores importantes que el suelo proporciona a las raíces de las plantas para su establecimiento; además de brindarle el soporte para su desarrollo (Foth, 1986 y Urbano y Rojo, 1992).

Lo anterior es razón de la necesidad de conocer todas y cada una de las propiedades indicadoras de calidad de un suelo para entender los efectos que provocan en el desarrollo de la vegetación que sostiene.

## 2.4 PROPIEDADES EDÁFICAS.

### 2.4.1 Propiedades físicas.

Las propiedades físicas de los suelos son aquellas que se relacionan con su morfología y estructura, que son utilizadas en su descripción o determinadas en el laboratorio y que equivalen a su arquitectura. Estas influyen sobre el comportamiento mecánico de las diferentes fases del mismo, las cuales a su vez tienen influencia en el desarrollo de las plantas (Tamhane, 1978 y García, 2003).

**Color.** El color es un carácter del suelo fácil de describir. El color del suelo se utiliza frecuentemente para obtener información acerca del contenido de M.O.S, condiciones de drenaje y por lo tanto de aireación, presencia de minerales y su estado de hidratación, procesos pedogenéticos, etc.

Las principales sustancias que dan al suelo su color son, el humus y algunos compuestos minerales como óxidos, sulfuros, sulfatos y carbonatos (Gaucher, 1971)

**Densidad real y aparente.** La densidad representa el peso por volumen unitario de una sustancia.

La densidad aparente (D.A.) es la relación de la masa del suelo seco por unidad de volumen total. Es una propiedad dinámica que varía con la condición estructural del suelo y tiene relación con el manejo y los cambios físicos que ocurren en él, como la compactación, lo que, en este sentido, afecta la estructura, la circulación del agua, del aire y el enraizamiento.

La densidad real (D.R.) es la relación de la masa del suelo seco por unidad de volumen de los sólidos.

El peso por volumen unitario de la parte sólida del suelo se llama densidad de partícula. Depende de las densidades acumulativas de los constituyentes individuales inorgánicos y orgánicos del suelo. Ésta algunas veces se denomina como densidad verdadera o real (Gaucher, 1971; Honorato, 2000 y USDA, 1998).

**Porosidad.** Corresponde a la porción de un volumen dado de suelo no ocupado por sólidos, sino por agua y/o aire y en los suelos es muy variable. La porosidad tiene una relación inversa con la densidad aparente, la cual aumenta considerablemente a valores bajos de esta. La porosidad interviene en el almacenamiento e infiltración de agua, aireación, penetración radical, entre otros (Honorato, 2000).

**Textura.** El suelo puede dividirse apropiadamente en tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida consta de una mezcla de partículas inorgánicas cuyo tamaño y forma varían considerablemente. La distribución proporcional de los diferentes tamaños de partículas minerales determina la textura de un suelo. Así, la textura del suelo se considera una de las propiedades básicas (Pritchett, 1991). La textura del suelo se refiere a la proporción relativa de las diversas partículas minerales, como arena, limo y arcilla (Young, 1991).

Es uno de los atributos más estables del suelo pudiendo sólo, ser modificada ligeramente por el cultivo y otras prácticas que causan la mezcla de las diferentes capas (USDA, 1998).

**Agua del suelo.** La cantidad de agua que puede estar disponible en el suelo en cualquier época del año está relacionada directamente con la precipitación y la cantidad de agua perdida a través de la evaporación y la transpiración. La capacidad de un suelo para abastecer de agua a los árboles, determina el grado en el que progresará la fotosíntesis (Harold *et al.*, 1984).

La capacidad del suelo para retener el agua está influida por las fuerzas adhesivas y cohesivas relacionadas con la matriz del suelo y por la atracción de las moléculas de agua para





El pH del suelo afecta significativamente la disponibilidad de nutrimentos para las plantas y para los microorganismos y su escala va desde extremadamente ácido, medianamente ácido, ligeramente ácido, muy ligeramente ácido, muy ligeramente alcalino, ligeramente alcalino, medianamente alcalino y extremadamente alcalino (Figura 4). Por ejemplo, en valores de pH bajos el Al, Fe y Mn son muy solubles y pueden ser tóxicos para las plantas (Cruz, 2000).

**Cationes intercambiables.** La capacidad de los suelos para retener los iones nutritivos en una forma disponible para el uso de las plantas es de especial importancia para los bosque que crecen sobre arenas y en otros suelos con reservas de nutrimentos excesivamente bajas. Este fenómeno, llamado intercambio iónico, es un proceso reversible mediante el cual tanto los cationes como los aniones se intercambian entre las fases líquida y sólida del suelo (Pritchett, 1991).

El intercambio iónico verdaderamente ha sido un aspecto crucial en la química del suelo. Las fuentes de intercambio catiónico en el suelo (el más importante) son las arcillas, la materia orgánica y los minerales amorfos.

La CIC de un suelo depende del pH del mismo, por su efecto en generar cargas negativas.

Los cationes intercambiables más importantes son:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ ; dichos cationes son básicos y se conocen como las bases de cambio (Honorato, 2000 y Cruz, 2000).

**Materia orgánica del suelo (MOS).** La MOS proviene de los restos de plantas y animales. Esto incluye hierbas, árboles, bacterias, hongos, protozoos, lombrices y un movimiento interminable de los elementos carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre entre los organismos vivos y los minerales.

La materia orgánica sirve para muchos fines en el suelo forestal; mejora la estructura del suelo y aumenta la porosidad y ventilación del mismo, además, la MOS influye en el régimen de temperatura, sirve como fuente de energía para los microorganismos del suelo y aumenta la retención de la humedad de los suelos forestales, retiene las sustancias nutritivas y las intercambia, y al descomponerse es una fuente de nutrimentos para los árboles (Young, 1991 y SICCFA. 1995).

Los suelos forestales se diferencian de otros por su elevada cantidad de materia orgánica y humus. Se dice que existen tres tipos de humus en suelos forestales:

- ❖ Mor, el cual contiene una capa orgánica que se diferencia de manera definida del suelo mineral subyacente.
- ❖ Mull, este consiste en una mezcla íntima de materia orgánica y suelo mineral.

- ❖ Duff mull o Moder, este posee algunas características tanto de los mull como de los mors (Young, 1991).

La MOS constituye el horizonte orgánico del mismo (horizonte O, orgánico), suprayace sobre el suelo mineral y está formado a su vez por mantillo reconocible (mor) de hojas, ramas, frutos, plantas y animales muertos ( $O_1$ ) y una zona inferior caracterizada por humus, mantillo descompuesto o en descomposición ( $O_2$ ), en el cual es irreconocible (Mull) el estado original del material orgánico (Supr, 1982).

**Elementos nutritivos.** Las plantas superiores, requieren para su desarrollo de sustancias químicas minerales. Las plantas absorben del suelo muchos elementos, pero no todos son esenciales. Los elementos que las plantas requieren a fin de completar su ciclo vegetativo y reproductivo se llaman elementos químicos esenciales. Estos se concentran en la solución del suelo y son de vital importancia para las plantas. La concentración de estos nutrimentos minerales en la solución del suelo varía ampliamente dependiendo de la humedad del suelo, profundidad, pH, cationes intercambiables, cantidad de materia orgánica, actividad microbiana y actualmente de la aplicación de fertilizantes y actividad humana.

Los elementos esenciales son dieciséis (Cuadro 3), reciben específicamente el nombre de *nutrimentos vegetales*. Ellos son, además del carbono (C), el hidrógeno y el oxígeno (H, O) que son absorbidos principalmente del aire y del agua y; 13 elementos que las raíces de las plantas absorben normalmente del suelo y cumplen los siguientes criterios de esencialidad:

- Su deficiencia limita el ciclo vital de la planta o provoca graves anomalías en su crecimiento y desarrollo.
- Esta deficiencia por un elemento específico se puede corregir si se suministra correctamente a la planta.
- Es un elemento que se relaciona directamente a la nutrición vegetal, es decir, no es un problema eventual y es imprescindible a la mayoría de las especies (Marschner, 1995 y Rodríguez, 1992).

**a) Clasificación de nutrimentos.** Con base en la cantidad que absorben las plantas, los nutrimentos se pueden clasificar en macronutrimentos y micronutrimentos.

Los macronutrimentos son requeridos en mayor cantidad, midiéndose respecto a las soluciones nutritivas, en gramos por litro ( $gL^{-1}$ ). Estos a su vez pueden dividirse en:

- ♣ Macronutrimentos primarios: nitrógeno, fósforo y potasio.
- ♣ Macronutrimentos secundarios: calcio, azufre y magnesio.



Los micronutrientes son los elementos absorbidos en menores proporciones; se miden en miligramos por litro ( $\text{mg L}^{-1}$ ), o en partes por millón (ppm) que representan la misma concentración. Ellos son: cloro, boro, zinc, manganeso, cobre, molibdeno y hierro. (Rodríguez, 1992; Cruz, 2000 y Salisbury, 1994).

Los nutrientes vegetales se convierten en formas disponibles para las plantas por medio de procesos de mineralización, descomposición de hojarasca e intemperización química (Young, 1991).

Cuadro 3. Elementos esenciales en nutrición vegetal.

ELEMENTO	SIMBOLO	FORMA QUÍMICA ABSORBIDA	CONCENTRACIÓN $\text{mg kg}^{-1}$ de tejido seco
Nitrógeno	N	$\text{NO}_3^{1-}$ , $\text{NH}_4^{1+}$	$15 \times 10^3$
Fósforo	P	$\text{HPO}_4^{2-}$ y $\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$	$2 \times 10^3$
Potasio	K	$\text{K}^{1+}$	$10 \times 10^3$
Calcio	Ca	$\text{Ca}^{2+}$	$5 \times 10^3$
Magnesio	Mg	$\text{Mg}^{2+}$	$2 \times 10^3$
Azufre	S	$\text{SO}_4^{2-}$	$1 \times 10^3$
Hierro	Fe	$\text{Fe}^{2+}$	$1 \times 10^2$
Cloro	Cl	$\text{Cl}^{1-}$	$1 \times 10^2$
Boro	B	$\text{H}_3\text{BO}_3$	20
Cobre	Cu	$\text{Cu}^{2+}$	6
Manganeso	Mn	$\text{Mn}^{2+}$	50
Molibdeno	Mo	$\text{MoO}_4^{2-}$	0.1
Zinc	Zn	$\text{Zn}^{2+}$	20

**b) Funciones de los nutrientes.** Los elementos esenciales cumplen diversas funciones indispensables en el metabolismo de las plantas.

➤ Nitrógeno. Constituye aproximadamente el 78% de la atmósfera en forma de  $\text{N}_2$ , pero este no se encuentra disponible para las plantas superiores. El nitrógeno se acumula en los suelos en forma de residuos vegetales y animales.

El nitrógeno total en los suelos forestales se encuentra sobre todo en las capas de humus de la cubierta forestal y en el horizonte A1. La cantidad varía desde una  $\text{t ha}^{-1}$  en suelos arenosos excesivamente drenados, hasta  $30 \text{ t ha}^{-1}$ , en bosques boreales que tienen una

profunda acumulación de humus. En estos últimos suelos la acumulación de nitrógeno se ve favorecida por el clima frío y por una gran humedad del suelo durante gran parte del año.

La fijación o mineralización del nitrógeno al suelo depende en gran medida del ritmo de descomposición de la MOS, de la temperatura y del pH y esta dada por la actividad de los microorganismos que lo dejan disponible. Las plantas lo asimilan en forma de iones nitrato y amonio. En la planta, el nitrógeno tiene una gran movilidad. Este elemento hace que estas tengan un color verde oscuro y más succulencia, fomenta el desarrollo vegetativo e impulsa la formación de follaje. El nitrógeno es componente de los aminoácidos, proteínas, nucleótidos, ácidos nucleicos, clorofila y coenzimas (Pritchett, 1991; Tisdale y Nelson, 1988; Hernández, 2000 y Cruz *et al.*, 2001).

➤ Fósforo. La materia orgánica es la principal fuente de fósforo para los árboles en muchos suelos. El contenido total de fósforo en suelos puede variar desde no más de 20 a 40 kg ha<sup>-1</sup> en el horizonte superficial A1 de la mayor parte de los suelos arenosos, hasta más de 2000 kg en algunos suelos ricos en fosfatos.

La cantidad de fósforo en la solución del suelo en cualquier tiempo dado es muy baja, por lo general menos de 1 ppm, y la cantidad disponible para las plantas queda influida por varios factores, entre los que están la acidez del suelo y la presencia de hierro y aluminio solubles, el tipo de humus y su tasa de descomposición. Los suelos que sostienen árboles de coníferas contienen un nivel relativamente bajo de fósforo.

En la planta el fósforo es un elemento móvil, está presente en los ácidos nucleicos, fosfolípidos, coenzimas y juega un papel preponderante en la transformación de energía química ya que forma parte de las moléculas de ATP y ADP, además de participar en la fosforilación de azúcares. Fomenta la formación de raíces laterales y fibrosas, lo que aumenta la superficie de absorción de nutrimentos. Hace mayor la resistencia a las enfermedades de las plantas y da un desarrollo normal de la célula. (Sánchez y Escalante, 1984; Pritchett, 1991 y Tamhane, 1978).

➤ Potasio. El potasio parece existir de manera abundante en la mayor parte de los suelos forestales. El elemento se deriva en primer lugar de los feldespatos y las micas. Existe en los suelos formando compuestos inorgánicos. En los suelos forestales su concentración va de 20 a 200 ppm y se encuentra en forma intercambiable, dichas concentraciones al parecer son adecuadas para el buen crecimiento de las plantas.

El papel más importante del potasio es el de activador del metabolismo vegetal y promotor de intercambios activos entre los otros elementos tanto en el medio nutritivo como en los tejidos. Controla y regula las actividades de varios elementos minerales esenciales. Uno de

los efectos más notables del K, es su facultad para incrementar la eficiencia fotosintética en condiciones de baja intensidad lumínica (Pritchett, 1991; Hernández, 2000 y Salisbury, 1994).

➤ Calcio. Existe en el suelo sobre todo en forma inorgánica, y en el suelo superficial puede haber de 50 a 1000 ppm o más en forma intercambiable. Los árboles de raíces profundas, con requerimientos elevados de calcio como son los árboles de madera dura, perforan el suelo buscando reservas del calcio de los horizontes inferiores y acumulan concentraciones de este elemento en el suelo superficial mediante la caída anual de las hojas.

Un contenido alto de calcio indica un pH cercano a la neutralidad, el cual es el más recomendable para las plantas y para la actividad de los microorganismos. Las raras deficiencias de calcio se presentan en suelos derivados de rocas ricas en magnesio (serpentinicas) o en suelos muy lavados o fuertemente ácidos, y saturados con aluminio. Aún en estos casos el contenido de calcio puede ser adecuado para las plantas, pero el alto contenido de magnesio y aluminio evita la absorción de calcio por la planta.

Es deseable un alto contenido de calcio ya que refleja concentraciones bajas de otros cationes intercambiables, que pueden generar problemas tales como, el aluminio en suelos ácidos principalmente y del sodio en suelos sódicos (Ortega, 1981).

Dado que es un nutrimento de participación estructural, forma parte esencial de todas las paredes y membranas, debe estar presente para la formación de nuevas células. Se piensa que contrarresta los efectos tóxicos del ácido oxálico al formar oxalato de calcio en las vacuolas de las células. Una vez que se depositan en los tejidos de las plantas, el calcio no es removilizado. En consecuencia, los tejidos jóvenes son los primeros en ser afectados cuando existen deficiencias de este nutriente (SICCFA, 1995).

➤ Magnesio. La mayor parte de los suelos forestales contienen altas cantidades de magnesio que aseguran un buen desarrollo de los árboles.

A pesar de ser el segundo catión intercambiable en concentración en los suelos, el magnesio es el menos estudiado de este grupo. Son poco comunes las cantidades excesivas o deficientes de magnesio en los suelos. En suelos arenosos ácidos, como son algunos suelos forestales, se han reportado deficiencias de magnesio.

El magnesio es un constituyente importante de muchos minerales aluminosilicatos primarios y secundarios (con excepción de los feldespatos) (Ortega, 1981 y Pritchett, 1991).

La molécula de clorofila contiene este elemento. Por tanto, es esencial para el proceso de fotosíntesis. El magnesio funciona como activador (catalizador) de muchas enzimas que se requieren para los procesos de crecimiento de las plantas.

El magnesio forma complejos terciarios con enzimas en las cuales funciona como transportador de electrones. Se enlaza para establecer la geometría precisa entre el sustrato y la enzima.

Una proporción alta de magnesio total está implicada en la regulación de pH celular y el balance catión-anión.

Un bajo contenido de magnesio en las hojas, no necesariamente implica deficiencias de este nutrimento sobre todo en la época de maduración pues el Mg es translocado a los frutos o a los órganos de reserva.

Las funciones del Mg en la planta están relacionadas con su gran movilidad dentro de las células, su capacidad para interactuar con ligandos fuertemente nucleofílicos (grupos fosfórilos) a través de enlace iónico y actuando como puente y/o formando complejos de diferente estabilidad.

Por último, interviene en la síntesis de aceites vegetales (Sánchez y Escalante, 1984 y Hernández, 2000)

➤ Azufre. El azufre se deriva en primer término de las piritas y del yeso, pero en los suelos arenosos, donde este material está ausente, la principal fuente de este elemento puede ser la atmósfera. En los suelos forestales, gran parte del azufre se acumula en la materia orgánica de los horizontes superiores.

El azufre es un elemento con poca movilidad. Es indispensable para formar parte de tres aminoácidos (cistina, metionina y cisteína), por lo tanto es esencial para las síntesis de proteínas.

Forma parte de las vitaminas. Constituye distintas enzimas con el sulfhidrilo como grupo activo, que actúan en el ciclo de los hidratos de carbono y en los lípidos. Interviene en los mecanismos de oxido-reducción de las células con el glutatión (López, 1990 y Tamhane, 1978).

El azufre es uno de los elementos indispensables en la nutrición de las plantas, puede estar en forma líquida, sólida y gaseosa en el suelo, tanto en forma inorgánica como en compuestos orgánicos.

El movimiento de iones sulfatos solubles hacia la superficie de la raíz es a través de difusión o de flujo de masa, principalmente.

La dinámica del ciclo del azufre tiene gran similitud con el ciclo del nitrógeno ya que en ambos, existen importantes componentes gaseosos y en el suelo están íntimamente ligados a la materia orgánica.

En la mayoría de los suelos, el contenido de sulfatos es menor al 25% del total de compuestos de azufre. En suelos con altos contenidos de óxidos e hidróxidos de aluminio y

hierro (Ultisoles, Oxisoles y Andosoles), hay una adsorción o retención de sulfatos, por lo que no son fácilmente disponibles para las plantas.

Los requerimientos de azufre de las plantas varía; por ejemplo en las gramíneas, el requerimiento es menor al de las leguminosas y en estas, menor que en las crucíferas, sin embargo en cereales el contenido de azufre en las proteínas es mayor al que presentan las leguminosas (Cruz, 2000).

#### **2.4.3 Propiedades biológicas.**

Las propiedades biológicas de los suelos están asociadas a la presencia e interacción entre los organismos que habitan en él.

Los tipos de organismos que se hallan en los suelos forestales no difieren mucho de los que se hallan en otros suelos. Sin embargo, la variedad, el número y la actividad de los mismos es por lo general mucho mayor en los suelos forestales (Honorato, 2000; Pritchett, 1991 y Plaster, 1997).

Los organismos del suelo tienen un papel muy importante en los suelos forestales y en el crecimiento de los árboles. Estos organismos descomponen la materia orgánica y liberan los nutrientes consumidos por los árboles. Incorporan la materia orgánica al suelo, mejorando con ello las propiedades físicas del mismo, su humedad, temperatura y aireación. También se ha observado que los organismos del suelo influyen en el desarrollo del perfil del suelo, sobre todo en la naturaleza del piso o superficie forestal (Young, 1991).

Los organismos del suelo, de acuerdo con su distribución y las funciones que llevan a cabo en el suelo, se dividen en microorganismos y animales del suelo.

Los microorganismos del suelo son: las bacterias, los hongos, los actinomicetos y algas.

Los animales son: protozoarios, los nemátodos, artrópodos y vertebrados (Pritchett, 1991)

**Actividad microbiana.** La biomasa microbiana a pesar de representar un pequeño porcentaje dentro de la reserva de la materia orgánica, es uno de los componentes más activos del mismo.

Por definición, los microorganismos, son parte del carbono orgánico y del conjunto de nutrientes y se les denomina biomasa microbiana e incluye organismos muy diferentes entre sí (bacterias, hongos, levaduras, algas, protozoos, etc.).

El carbono de la biomasa microbiana puede utilizarse de forma más efectiva que la materia orgánica en general, o el carbono orgánico total en particular, como indicador de las variaciones sufridas en la calidad de un suelo, ya que responde de forma más rápida y sensible a los cambios que se puedan producir en el mismo (degradación, contaminación, usos del suelo



etc.). Así, las medidas a corto plazo de la biomasa microbiana, pueden marcar la tendencia de la materia orgánica del suelo a largo plazo. También se ha empleado como índice de comparación entre sistemas naturales y degradados. Es por ello que la estimación de carbono en biomasa microbiana es de fundamental importancia (Salazar, 2001).

#### **2.4.4 Propiedades bioquímicas.**

El resultado de las funciones vitales de los organismos del suelo, especialmente de los microorganismos, son procesos bioquímicos mediante los cuales se sintetizan diversas sustancias. Estas son parte de las propiedades bioquímicas del suelo. Se trata entonces de una mezcla orgánica heterogénea que incluye sustancias sintetizadas biológica y/o químicamente a partir de productos de degradación. La materia orgánica es la sede y la base de estas transformaciones (Honorato, 2000).

**Respiración del suelo.** Un parámetro ampliamente utilizado para medir la actividad microbiana ha sido la "respiración del suelo". La medida del desprendimiento de CO<sub>2</sub>, se ha empleado para estimar la biomasa microbiana del suelo que realmente es activa. La medida de respiración del suelo en presencia de productos potencialmente tóxicos empleados puede permitir evaluar los daños causados por estos productos sobre las funciones fisiológicas de los suelos. La determinación del desprendimiento de CO<sub>2</sub>, también es útil para conocer el efecto de determinadas variables sobre la oxidación de la materia orgánica *in situ*, pero en ningún momento puede indicar qué sustrato orgánico en particular está siendo catabolizado.

La respiración del suelo es altamente variable, tanto espacialmente como estacionalmente, y está fuertemente afectada por condiciones de humedad y temperatura (USDA, 1998).

**Actividades enzimáticas.** Las enzimas son catalizadores biológicos de innumerables reacciones del suelo. Las enzimas del suelo son similares a las de otros sistemas y las reacciones que catalizan son dependientes de multitud de factores tales como pH, temperatura, presencia o ausencia de inhibidores, etc.

Las actividades enzimáticas son específicas de un sustrato y están relacionadas con reacciones específicas. Por ello es difícil conseguir, mediante un solo valor de actividad enzimática, el conocimiento del estado general de nutrientes de un suelo o determinar el índice de actividad microbiana del mismo. Sin embargo, medidas simultáneas de varias enzimas, sí pueden resultar útiles como marcadores de bioactividad y pueden ser utilizadas como índices de fertilidad bioquímica del suelo (Doran y Parkin, 1994).

Se considera que la actividad enzimática es una de las numerosas formas de medir la calidad del suelo.

Las fosfatasas son ectoenzimas secretadas por la raíz de plantas y algunos microorganismos del suelo, como respuesta a una situación de estrés por carencia de fósforo. Su actividad es mayor sobre la superficie de la raíz que en el volumen del suelo, estas enzimas permanecen en el suelo ya sea asociadas con células no vivas o restos de estas, o bien, inmovilizadas en la matriz del suelo, conservando su capacidad hidrolítica (Marschner, 1995; citado por Granados, 2003).

La disponibilidad de fósforo está asociada a la actividad de enzimas fosfatasas, las cuales rompen los enlaces éster-fosfatos de moléculas orgánicas que permiten la formación de moléculas de carácter inorgánico asimilables por las plantas. En algunos casos la actividad de las fosfatasas se ha utilizado como índice de la disponibilidad de fósforo, además de que aumentan la eficiencia de fertilizantes fosfatados y en ocasiones se han correlacionado positivamente con los estados de oxido-reducción (Dick y Tabatabai, 1984, citados por Reyes, 2002).

Las fosfatasas fueron clasificadas, de acuerdo al pH óptimo para su actividad, en fosfatasas ácidas ó fosfomonoesterasas, y fosfatasas alcalinas. La relación inversa hallada entre el pH del suelo y la actividad de la fosfatasa ácida, sugirió que su estabilidad varía con relación al pH del suelo (Eivazi y Tabatabai, 1977).

## 2.5. BOSQUE DE *Abies religiosa* (H.B.K) Schtl et Cham.

Se clasifica a los bosques de *Abies* dentro de los bosques templados subhúmedos o bosques mixtos.

En México han existido desde hace millones de años y ocupan el 15% del territorio del país. Por su extensión los bosques de *Pinus* y de *Pinus-Quercus*, ocupan el primer lugar en importancia, le siguen los bosques de *Juniperus* y los de *Abies*, siendo estos últimos de distribución muy restringida y localizada.

Los bosques mexicanos de *Abies* tienen su origen a partir de biota que arribó por el norte, en épocas en que el clima favoreció su expansión y migración.

En México se conocen por lo menos ocho especies de oyamel (*Abies*). Constituye bosques generalmente monoespecíficos y también están en bosques mixtos. La especie mejor distribuida, principalmente en la región central, es *A. religiosa*, la cual es endémica de México (Rzedowski, 1978 y Challenger, 1998) y se encuentra registrada en la categoría de Amenazada (A) dentro de la Norma Oficial Mexicana 059 (SEMARNAT, 2001).



### 2.5.1 Taxonomía.

- Taxa: Gimnospermas
- División: Coniferophyta
- Clase: Coniferopsida (Pinopsida)
- Orden: Coniferales.
- Familia: Pinaceae (Pináceas)
- Género: *Abies*
- Nombre científico: ***Abies religiosa* (H.B.K) Schtl et Cham** (Santamarina *et al.*, 1997 y Niembro, 1990).

### 2.5.2 Nombre(s) común(es).

La especie *A. religiosa*, es conocida generalmente con los nombres de oyamel, pinabete y en lengua náhuatl como "ocoxatl" (Manzanilla, 1976 citado en Ángeles, 1998). Pero existen muchos otros nombres locales (Cuadro 4) por los que es conocido (Mayen, 1987).

Cuadro 4. Nombres comunes de la especie *A. religiosa*.

ESTADO	NOMBRE COMUN
Veracruz	Acshoyatl
Edo. de México	Bansú (lengua otomí)
Hidalgo	Ocopetla
Teotepac, Guerrero	Oyamel
Edo. México e Hidalgo	Pinabete
Michoacán y Jalisco	Thúcum (lengua tarasca)
Michoacán	Ueyomel
Ixcatepec, Gro	Xolócotl

### 2.5.3 Forma biológica: descripción.

Árbol monóico de 35 a 40 m de altura, en ocasiones hasta 60 m, y diámetro normal hasta de 1.80 m (Mayen, 1987).

Posee hojas en forma de agujas marcadas con dos líneas ceras en la parte inferior y escotadas en el ápice (Santamarina *et al.*, 1997).

Sus estructuras reproductivas masculinas y femeninas se presentan desde diciembre, llegando a la polinización en los meses de marzo-abril del siguiente año. Los conillos fecundados maduran hacia noviembre y en diciembre del mismo año se da la diseminación (Figura 5). En general la reproducción inicia a los 25 años, viéndose afectada por la densidad (Manzanilla, 1976 citado en Ángeles, 1998 y Mayen, 1987).

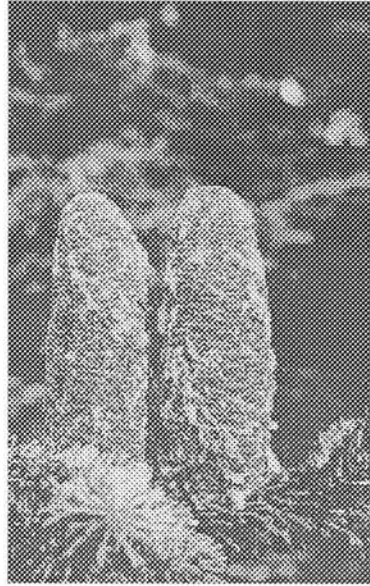


Figura 5. Conos resinosos de *A. religiosa*.

#### 2.5.4 Distribución en México.

Los bosques de esta especie se encuentran distribuidos principalmente en el centro del país; en la mayoría de los casos se encuentran restringidos a un cerro o una cañada y las áreas continuas de mayor extensión se encuentran presentes en las serranías que circundan al Valle de México y en las montañas del eje Neovolcánico (Manzanilla, 1976 citado en Ángeles, 1998 y Rzedowski, 1978).

Esta especie se encuentra distribuida en los estados de México, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Michoacán, Jalisco, Morelos, Guerrero y Tlaxcala; entre los 17° 30' y 21° 00' latitud norte y entre 97° y 104° 00' longitud oeste (Manzanilla, 1976 citado en Ángeles, 1998).

#### 2.5.5 Requerimientos ambientales

Altitud. Manzanilla (1976), citado en Ángeles, (1998); menciona que su límite inferior es de 2100 msnm en exposición SO. El nivel superior lo alcanza en el Ajusco, D.F a los 3600 msnm; en los límites extremos generalmente se encuentra mezclado con otras especies, mientras que en la parte media de su distribución se encuentran en su altitud óptima 3,200 dominando, rodales puros.

Clima. *A. religiosa* se encuentra en laderas protegidas de vientos fuertes y de la insolación intensa, en donde la humedad es elevada debida a la precipitación media anual superior a los 1000 mm, distribuida en 100 o más días con lluvia apreciable (Manzanilla, 1976, citado en Ángeles, 1998).

La oscilación diurna de la temperatura tiene un promedio anual de 11 a 16°C. La fórmula climática que corresponde generalmente a estos bosques es C(E)w (Rzedowski, 1978).

Exposición. *A. religiosa* prefiere las laderas sombreadas con exposición Norte, sin embargo se encuentra indistintamente en cualquier clase de exposición (Amezcuca y Valderrama, 1999)

Pendiente. Estos bosque se encuentran sobre pendientes que varían desde 17% hasta 60% (Madrigal, 1967 citado en Ángeles, 1998). Estudios recientes, indican que en el Parque Nacional “El Chico”, estado de Hidalgo, *A. religiosa* se encuentra en pendientes que varían desde 20 hasta 80% por lo que se determina que este aspecto físico del terreno no influye para su establecimiento (Amezcuca y Valderrama, 1999).

Suelo. Los suelos en los que generalmente se desarrollan los bosques de *A. religiosa* son del tipo Andosol principalmente, los cuales son derivados de cenizas volcánicas con alto contenido de materia orgánica hasta 70%, especialmente en horizontes superficiales, profundos, bien drenados y con alta capacidad higroscópica, ligeramente ácidos con pH que van de 5 a 7 y contenido regular de minerales amorfos, como alófono, que limitan la disponibilidad de P asimilable. Sin embargo *A religiosa* no se desarrolla exclusivamente en este tipo de suelos, ya que también está reportada en suelos de tipo Cambisol (Hernández, 1990; Melo y López, 1993; citados por Amezcuca y Valderrama, 1999).

El oyamel en general, se desarrolla sobre suelos jóvenes, los Inceptisoles y Espodosoles son frecuentes, los cuales tienen dos o tres horizontes. El color que presentan corresponde a tonos 10YR de las tablas Munsell. La estructura puede ser granular o en bloques y las clases texturales predominantes son Limoso-arenoso, arcillo-arenoso o arenosos (Manzanilla, 1976 citado en Ángeles, 1998).

Aunque generalmente se establecen en suelos profundos, en el Estado de México y en Jalisco se encuentran sobre una capa muy delgada de cenizas volcánicas; también se menciona que las propiedades físicas del suelo influyen más en el desarrollo de oyamel que las químicas, la profundidad, el drenaje, la textura, estructura y el contenido de humus son propiedades decisivas en el desarrollo del oyamel (Manzanilla, 1976 citado en Ángeles, 1998).

### **2.5.6 Usos.**

Un uso muy importante es como “árbol de navidad”, además sus ramas se utilizan para hacer adornos en ceremonias religiosas.

La madera no es de muy buena calidad, pero se recomienda para fabricar papel, ya que la pulpa es de muy buena calidad; como madera aserrada se puede utilizar en la fabricación de

cajas, puertas, marcos y techos interiores, fabricación de postes que transmiten energía eléctrica, cercas, durmientes y palos de escoba.

Por su color claro, peso ligero, ausencia de manchas y de resina, y su carencia de olor se recomienda como apropiada en la fabricación de empaques para alimentos, como pescado, azúcar, etc. La trementina, "aceite de palo" "aceite de "abeto", es recomendada para su empleo medicinal; la corteza de árboles viejos es utilizada para carbón, y la madera en la construcción de casas (Mayen, 1987; Manzanilla, 1976 citado en Ángeles, 1998).

## **2.6. ANÁLISIS MULTIVARIADO.**

Los métodos multivariados son extraordinariamente útiles para ayudar a los investigadores a hacer que tengan sentido conjuntos grandes y complejos de datos que constan de una gran cantidad de variables medidas en números grandes de unidades experimentales. La importancia y la utilidad de los métodos multivariados aumenta al incrementarse el número de variables que se están midiendo y el número de unidades experimentales que se están evaluando (Johnson, 2000).

Los datos multivariados consisten en observaciones sobre diferentes variables para un número de individuos u objetos, y en general el término se refiere al método estadístico que analiza simultáneamente estas múltiples variables (Chatfield y Collins, 1989 y Hair *et al.*, 1995).

Muchas técnicas multivariadas tienden a ser de naturaleza exploratoria en lugar de confirmatoria. Las técnicas multivariadas suelen ser útiles para examinar los datos en un intento por saber si hay información valiosa de esos datos; de esta manera ayudan a los investigadores a crear nuevas variables que tengan propiedades deseables.

### **2.6.1 Análisis de Componentes Principales (ACP).**

Una de las técnicas que crea nuevas variables es el Análisis de Componentes Principales; este consiste en la reducción de la información disponible sobre un conjunto de individuos, de los cuales se han tomado diversas observaciones sobre varias de sus características.

En el ACP se usa un método matemático que transforma un conjunto de variables respuesta correlacionadas en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas entre sí, conocidas como componentes principales (Johnson, 2000 y Pérez, 1996).

Los objetivos del ACP son: 1) reducir la dimensionalidad del conjunto de datos e 2) identificar nuevas variables significativas subyacentes o de mayor robustez (VR). El objetivo 1 es básico ya que intenta descubrir la dimensionalidad verdadera del espacio en el que se

encuentran los datos. En el proceso se pueden formar nuevas variables llamadas *componentes principales*, en orden decreciente de importancia, de modo que:

- ◆ No estén correlacionadas
- ◆ La primera componente principal explique tanto de la variabilidad en los datos como sea posible
- ◆ Cada componente subsiguiente tome en cuenta tanto de la variabilidad restante como sea posible (Johnson, 2000)

Los análisis de componentes principales provienen de una matriz de correlación  $X$  en donde:

$N$  = número de unidades experimentales sobre las que se miden variables.

$p$  = cantidad de variables numéricas que se están midiendo.

$X_{rj}$  = valor de la  $r$ -ésima unidad experimental en la  $j$ -ésima variable respuesta.

Para  $r = 1, 2, \dots, N$ ; y  $j = 1, 2, \dots, p$ ; se genera la matriz de datos de modo que,  $X_{rj}$  es el elemento en el  $r$ -ésimo renglón y la  $j$ -ésima columna de la propia matriz.

$$\begin{pmatrix} X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1p} \\ X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2p} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{N1}, X_{N2}, \dots, X_{Np} \end{pmatrix}$$

Al reducir la dimensionalidad de la variable  $X$ , se construye una nueva variable  $U$  con  $r < p$ , cuyas componentes  $U_{rj}$  sean combinaciones lineales de las  $X_{rj}$  y de manera que expliquen una proporción suficientemente grande de la dispersión total contenida en los datos originales

A partir de la matriz  $X$ , obtenemos las varianzas de cada una de las  $p$  variables y la suma de ellas nos da la medida de la dispersión total de los datos. Con la mayor varianza posible se obtiene la variable  $U_1$  o componente principal 1 y que se corresponde con el eigenvalor más grande. La segunda componente principal se elige de modo que la varianza sea mayor entre todas las combinaciones lineales de  $X$  y que no este correlacionada con la primera variable componente principal y que corresponda con el segundo eigenvalor más grande. De manera semejante se pueden definir los componentes principales adicionales (Pérez, 1996).

Para decidir que componentes principales excluir, para reducir la cantidad de datos, se debe considerar:

1. Los componentes requeridos expliquen preferentemente el 90% de la variabilidad total.
2. Excluir los componentes cuyos valores propios asociados sean menores que la media (eigenvalor  $< 1$ , con variables estandarizadas).
3. Elegir los componentes principales requeridos, de tal forma que queden representadas todas las variables, es decir que, con los componentes principales elegidos se explique el mayor porcentaje de variabilidad ( $r$  cercana a 100) (Rencher, 1995).

### **2.6.2 Análisis por agrupación: Análisis Cluster.**

El análisis cluster (AC) es una serie de técnicas, fundamentalmente algoritmos, que tienen por objeto la búsqueda de grupos similares de individuos o de variables que se van agrupando en conglomerados. El análisis cluster sirve para clasificar en grupos homogéneos las variables observadas. Los individuos que queden clasificados en el mismo grupo serán tan similares como sea posible (Pérez, 1996).

El análisis cluster comprende al método del vecino más cercano, el cual es un método de agrupación jerárquica, en el que los puntos datos observados se concentran en agrupamientos en una sucesión anidada de agrupaciones. Los métodos más eficientes de agrupación jerárquica se conocen como métodos de agrupación de un solo enlace.

El método del vecino más cercano lleva a cabo los siguientes pasos:

1. Inicia con  $N$  agrupaciones, en donde cada uno de ellos contiene exactamente un punto dato.
2. Enlaza los dos puntos más cercanos según una de las tres medidas seleccionadas de la distancia.
3. Define la desemejanza entre este nuevo agrupamiento y cualquier otro punto como la distancia mínima entre los dos puntos del agrupamiento y este punto.
4. Continúa combinando los agrupamientos que sean los más cercanos entre sí de modo que, en cada etapa, la cantidad de agrupamientos se reduzca en uno y la desemejanza entre cualquiera de estos dos siempre se defina como la distancia entre sus miembros más cercanos (Johnson, 2000).



### 3. PROBLEMÁTICA.

#### 3.1 Antecedentes.

Sobre calidad del suelo y en particular su relación con el estado nutricional de *Abies religiosa* en el país no se han realizado investigaciones. Sin embargo, algunas se han encaminado a conocer la calidad edáfica desde el punto de vista de la productividad agrícola y no a la sustentabilidad del ecosistema que es uno de los aspectos que motivaron el presente trabajo.

Los trabajos examinados al respecto son: Estudio de las relaciones entre la vegetación forestal, el suelo y algunos factores climáticos en seis sitios del declive occidental del Iztaccíhuatl (Anaya, 1962); Evaluación nutrimental de *Abies religiosa* en el desierto de los leones, DF, (López, 1993); La vegetación alpina y subalpina del declive occidental del volcán Popocatepetl, México (Escamilla, 1996); Uso del DRIS para determinar necesidades de fertilización de *Abies religiosa* (HBK) Schl. Et Cham., en vivero (Moreno, 1996); Indicadores de calidad del suelo en tres cronosecuencias de bosque mesófilo, sierra norte, Oaxaca (Bautista, 2001) e Indicadores de calidad del suelo, estado nutrimental y calidad de fruto en huertos de aguacate cv Hass con manejo orgánico integrado (Castillo, 2002).

#### 3.2 Justificación

Los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, se encuentran en la parte central del país, rodeados por una gran cantidad de asentamientos humanos, los cuales se ven beneficiados de manera directa o indirecta, por los ecosistemas que estas montañas albergan.

Los bosques de *Abies religiosa* contribuyen a la captación de agua atmosférica, la cual se infiltra en dichas montañas y mantiene así, el nivel freático de los valles adyacentes. También participa en la captación de CO<sub>2</sub> y por lo tanto contribuye en la reducción de éste en la atmósfera.

De manera particular estos bosques proveen de leña, plantas ornamentales, madera, etc., a la población circundante.

La presión antropogénica que estos bosques sufren debido a actividades como la agricultura, la ganadería, el desmonte, etc; afectan directamente al recurso suelo. La zona de influencia al PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl es diversa en recursos (entre ellos los bosques de *Abies religiosa*) y por dicha presión antropogénica su conservación se encuentra en peligro.

Los desmontes y la tala constituyen dos de las actividades importantes que afectan negativamente al bosque de *Abies religiosa*. Los primeros se realizan fundamentalmente con el propósito de utilizar el terreno para fines agrícolas y han hecho disminuir significativamente las

extensiones forestales. En muchas zonas densamente pobladas lo único que se ha respetado son las laderas abruptas no aptas para ningún tipo de agricultura (SARH, 1992).

Hasta ahora los estudios realizados en esta zona, tienen como base el dar una descripción de los ecosistemas que estas montañas albergan o de los organismos que en ellos habitan pero ningún trabajo se ha dedicado a describir el estado de conservación en el que se encuentra el recurso suelo y por ende, el de los bosques.

Es importante conocer el estado de conservación de los recursos, para protegerlos por su fragilidad, poder conservarlos y darles el valor que para el ecosistema proveen.

Por tal motivo, es importante diagnosticar la calidad edáfica mediante evaluación de sus propiedades físicas, químicas y biológicas y saber como influye ésta en el estado nutrimental del bosque de *Abies religiosa*; para con ello, determinar el uso sustentable del recurso natural.



## 4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.

### 4.1 Hipótesis.

- Entre los parámetros físicos y químicos del suelo, MOS, pH y textura destacan como los mejores indicadores de la calidad edáfica.
- De la calidad edáfica depende la concentración y el balance adecuado de los nutrimentos en el tejido foliar de *Abies religiosa*.
- Los sitios que se encuentran entre los límites del PN y la zona agrícola, poseen menor calidad edáfica por causa de la presión que las actividades antropogénicas ejercen.

### 4.2 Objetivos.

De acuerdo con el panorama general descrito, se plantearon los siguientes objetivos:

#### General.

Evaluar indicadores físicos, químicos, biológicos y bioquímicos de calidad del suelo y determinar su relación con el estado nutrimental de *Abies religiosa* (H.B.K) Schl et Cham, en la exposición occidente de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl.

#### Particulares.

Evaluar las propiedades físicas, químicas, biológicas y bioquímicas (color, pH, conductividad eléctrica, textura, densidad real y aparente, % de humedad, % MO, Cationes intercambiables, % de N-total, P-disponible,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ , actividad microbiana y enzimática) del suelo, como indicadores de su calidad.

Determinar con base en los mejores indicadores de calidad de suelo, el índice de calidad de suelo (ICS) para todas las unidades ambientales.

Determinar la concentración de los nutrimentos:  $N_{total}$ ,  $P_{total}$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  en el tejido foliar de *Abies religiosa* (H.B.K.) y la reserva de los mismos contenida en el mantillo.

## 5. MATERIALES Y METODOS

### 5.1 Zona de estudio: Parque Nacional Iztaccíhuatl y Popocatépetl

El área de estudio se encuentra dentro de la zona de influencia del Parque Nacional Iztaccíhuatl y Popocatépetl, en la exposición occidental.

Los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl se encuentran localizados entre los límites de los Estados de México, Puebla y Morelos. Los municipios de Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatepec corresponden a la exposición occidental.

Las montañas Iztaccíhuatl y Popocatépetl, fueron decretadas Parque Nacional desde el 8 de noviembre de 1935. Para 1947, se decretó la cota altitudinal de 3,600 m.s.n.m. y se estipularon 25,679 hectáreas.

Se localiza geográficamente entre los meridianos de coordenadas  $98^{\circ} 35'$  y  $98^{\circ} 42' 40''$  de longitud oeste y entre los paralelos de  $18^{\circ} 59'$  y  $19^{\circ} 15' 30''$  de latitud norte (García, 1999).

#### a) Aspectos Físicos

Esta área natural se localiza sobre el Sistema Neovolcánico Transmexicano y la topografía del lugar comprende al "Iztaccíhuatl", palabra de origen náhuatl que significa "Mujer Blanca" o también llamada "Mujer Dormida", con siete kilómetros de longitud, en la que se distinguen de Norte a Sur, tres alturas (la cabeza, con 5,146 metros de altura el pecho, con 5,286 metros y los pies, con 4,740 metros) y el Popocatépetl que significa "Monte o Cerro que Humea", el cual es un estratovolcán y tiene la forma de un cono truncado hacia la cima. En cuanto al material geológico, está formado por una combinación de lavas, brechas, tobas y depósitos piroclásticos sin consolidar, basalto labradorítico, andesita de hiperstena y traquita.

El Izta-Popo se encuentra en el sistema orográfico Sierra Nevada, originado durante el Terciario por actividad volcánica

Los tipos de suelos aflorantes en esta zona son el Regosol dístico, los Litosoles (Leptosol), el Andosol mólico y el Cambisol eútrico (García, 1999 y Chávez y Trigo, 1996).

Los Andisoles, son suelos derivados de cenizas volcánicas y se han definido como suelos minerales que presentan un horizonte A de color entre pardo oscuro y negro, con un espesor promedio de 30 cm de estructura migajón fina o granular, con un contenido de MO de cerca del 8% en promedio y niveles superiores al 30% en los miembros más oscuros del grupo, texturas franco arenosa y pH moderadamente ácido. Algunos miembros del grupo tienen distintos horizontes B con más arcilla que los horizontes A, pero el miembro más joven es esencialmente un perfil AC. Se presentan en suelos húmedos a perhúmedos con temperaturas variadas. En condiciones naturales presentan vegetación diversa dependiendo del clima donde se desarrollen, puede ser de bosque templado húmedo a bosque tropical; en México son de

amplia distribución a lo largo del eje Neovolcánico sosteniendo asociaciones vegetales de *Quercus*, *Pinus* y *abies* (WRBSR, 1994 y Cruz, 2000).

Los Regosoles son suelos someros, desarrollados sobre material mineral no consolidado y presenta un perfil AC con horizonte único de diagnóstico ócrico.

El concepto central de un Regosol se base en su profundidad, drenaje, textura media, suelo mineral no diferenciado que tiene expresiones mínimas del horizonte de diagnóstico.

El material parental y el clima determinan la morfología del Regosol. Son comunes en zonas áridas y en regiones montañosas. Se encuentran en asociación con Andisoles, Leptosoles, Calcisoles, Arenosoles y Cambisoles (FAO, 2002).

Con respecto a los cuerpos de agua, en la zona existen cuatro ríos (Amecameca, Molinos, Akal y Atila) y otros escurrimientos perennes menores.

### **b) Aspectos Biológicos**

La vegetación de la zona que se encuentra en el Estado de Morelos es: *Pinus hartwegii*, *P. ayacahuite*, *P. michoacana cornuta*, *P. pseudostrobus*, *P. macrocarpa*, *Abies religiosa*, *Cupressus lindleyi*; en sitios de mayor altitud se localiza el *Pinus oocarpa*, en altitudes entre 2,700 y 3,200 metros; en altitudes de 3,000 a 3,500 metros se localiza la siguiente vegetación: *Pinus lawsoni*, *P. leiophylla*, *P. oocarpa*, *P. pringlei* y *P. teocote*; así como las especies de encino: *Quercus mexicana*, *Q. crassipes*, *Q. rugosa* y *Q. macrophylla*; otras especies de árboles forestales: *Clethra mexicana*, *Arbutus xalapensis*, *A. glandulosa*, *Arctostaphylos arguta*, *Buddleia cordata*, *B. americana* y *Dodonaea viscosa*. En altitudes de 3,200 a 4,250 metros se encuentra vegetación herbácea como son: las gramíneas *Muhlenbergia* spp, *Sporobolus* spp, *Festuca* spp y *Stipa* spp; también son frecuentes las dicotiledóneas como: *Lupinus* sp y *Penstemon* sp. A partir de los 4,250 m de altitud se inicia la vegetación de pastizal alpino y las nieves perpetuas.

En el Estado de México la vegetación que se encuentra en el parque Izta-Popo esta compuesta por *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis*, *P. teocote*, *P. leiophylla*, *Quercus laurina*; otras especies son: *Cornus disciflora*, *Garrya laurifolia*, *Ilex toluhana*, *Meliosa dentata*, *Oreopanax xalapensis*, y *Prunus brachybotrya*. Vegetación de zacatal: *Festuca toluensis*, *F. livida*, *F. amplissima*, *Calamagrotis toluensis*, *Muhlenbergia quadridentata*, *Trisetum spicatum*, *Agrostis toluensis* y *Poa orizabensis*.

Finalmente, para el Estado de Puebla sólo podemos mencionar que existen *Pinus ayacahuite*, *Alnus mexicana*; bosques de oyamel, bosques de pino, bosques de pino-encino y zacatal. (Vargas, 1984 y Chávez y Trigo, 1996).

### 5.1.1 Delimitación de la zona de estudio.

La selección de la zona de muestreo se hizo con base en la distribución altitudinal reportada para *Abies religiosa* que está entre los 2100 y 3600 msnm.

De la zona de estudio el área muestreada es de dimensión grande ya que comprende tanto terrenos comunales como ejidales de las comunidades de Amecameca, San Pedro Nexapa y Atlautla de Victoria, todas hacia la parte central de la exposición oeste de los volcanes Iztaccihuatl y Popocatepetl. Por ello se delimitó la zona de muestreo con la ayuda de mapa topográfico y fotografías aéreas que permitieron la planeación del muestreo, que consistió en la selección previa de los sitios con mayor homogeneidad en sus atributos y diferencias marcadas con terrenos vecinos (Figura 6).

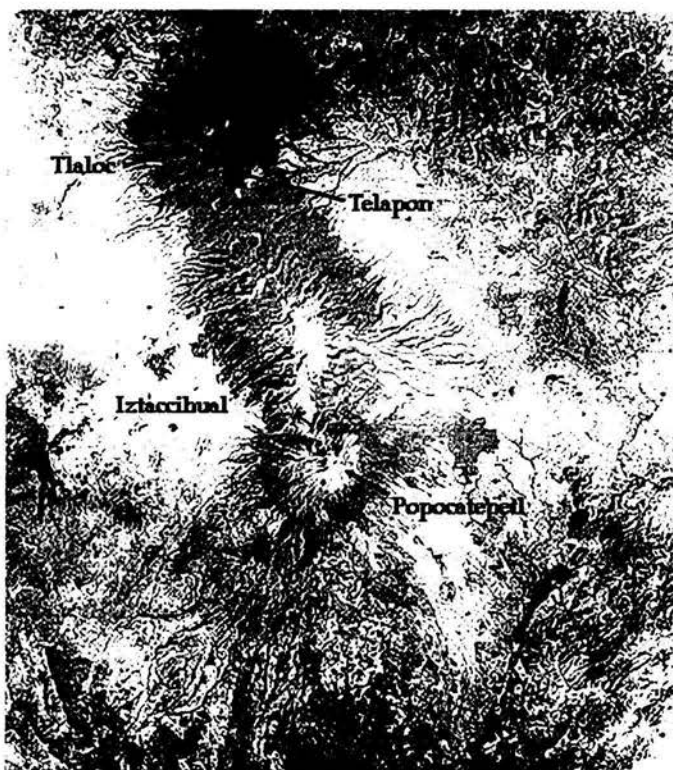
El resultado de la selección de sitios sobre fotografías aéreas, fueron áreas extensas y homogéneas, denominadas facetas o unidades ambientales y se caracterizaron como O, con oyamel predominante; D, zona de disturbio y F, Faceta y fueron numeradas progresivamente.

### 5.1.2 Sitio: punto de muestreo

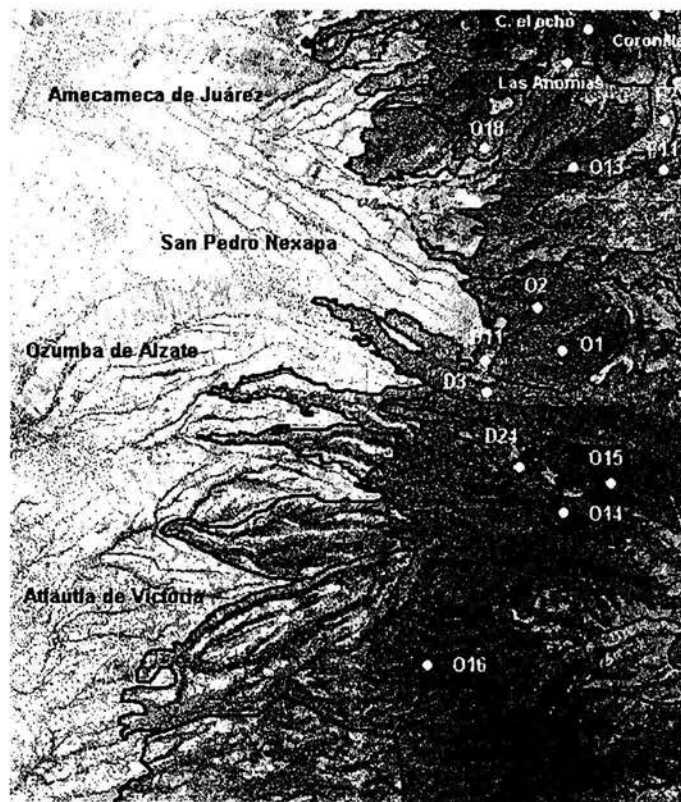
El área recomendada como unidad de muestreo puede variar desde 2 hasta 8 hectáreas, lo que depende del grado de heterogeneidad encontrada, objetivos del estudio y facilidades para el muestreo.

Para localizar en campo a cada una de las facetas se utilizó un Geoposicionador (GPS). Localizada la faceta, se buscó un sitio de muestreo, representativo de toda el área; es decir, el sitio deberá presentar homogeneidad en tipo de vegetación y geoforma.

En cada sitio de estudio se registraron datos de campo (Apéndice 2), los cuales distinguieron a cada muestra colectada. La determinación de la pendiente y exposición se obtuvo con una brújula con clicímetro marca LUFT y la altitud, latitud y longitud con un GPS marca GARMIN.



a



b

Figura 6. a) Imagen de satelital del macizo volcánico Iztaccíhuatl-Popocatepetl; b) unidades ambientales y puntos de muestreo

## 5.2 TOMA DE MUESTRAS.

### 5.2.1 Muestras de suelo.

Cuando la finalidad de la toma de muestra es estimar la fertilidad u otra característica promedio de un terreno, se recomienda trabajar con muestras compuestas, lo que permite ahorrar tiempo y dinero. Los resultados provenientes de la muestra compuesta no son significativamente diferentes del promedio que resultaría del análisis individual de las submuestras.

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 la muestra de suelo fue compuesta, para el sitio seleccionado se eligieron cuatro puntos y se colectó una submuestra, dichas submuestras se homogeneizarán para obtener una muestra compuesta.

Para determinar las propiedades físicas y químicas del suelo, en el sitio se colectaron cuatro submuestras con una pala a profundidad de 0-20 cm (Figura 7a) y de aproximadamente 1 kg cada una, las cuales fueron mezcladas y homogeneizadas para obtener una muestra compuesta de cada sitio, la cual fue trasladada en bolsas plásticas etiquetadas al laboratorio para su posterior análisis.

El fundamento sobre el cual se sustentó la colecta de muestras radica en que no se efectuaría una clasificación del suelo, sino su análisis químico y físico de áreas específicas (Jackson, 1982).

Para determinar parámetros biológicos y bioquímicos, se obtuvieron seis submuestras a una profundidad de 0-10 cm con ayuda de una barrena, estas fueron mezcladas para homogeneizarlas y obtener una muestra compuesta la cual se transportó al laboratorio en frasco plástico etiquetado y cerrado herméticamente (Figura 7b) para conservarlo hasta su procesamiento (Atlas y Bartha, 1987).

### 5.2.2 Muestras de Mantillo.

Para obtener las muestras de mantillo (horizonte orgánico del suelo y que se encuentra compuesto de hojas, ramas, frutos, plantas y animales muertos, todos reconocibles), se midió un cuadrante de 1 m<sup>2</sup> en cada sitio de colecta (Figura 7c); todo lo que se encontró dentro de este cuadrante hasta la profundidad del horizonte A<sub>1</sub> o mineral fue colectado y depositado en bolsas de plástico etiquetadas y se transportaron al laboratorio para su posterior tratamiento.



### 5.2.3 Muestras foliares.

En cada sitio de estudio se eligieron cuatro ejemplares de *Abies religiosa* dominantes y codominantes, de edad adulta y vigorosos, a estos se les cortaron algunas ramas laterales de los dos últimos años de crecimiento (Figura 7c), orientadas hacia los cuatro puntos cardinales y libres de competencia por luz. La muestra compuesta fue transportada en bolsas de papel de estraza etiquetadas (Wells y Allen, 1985 citados por López, 1993).

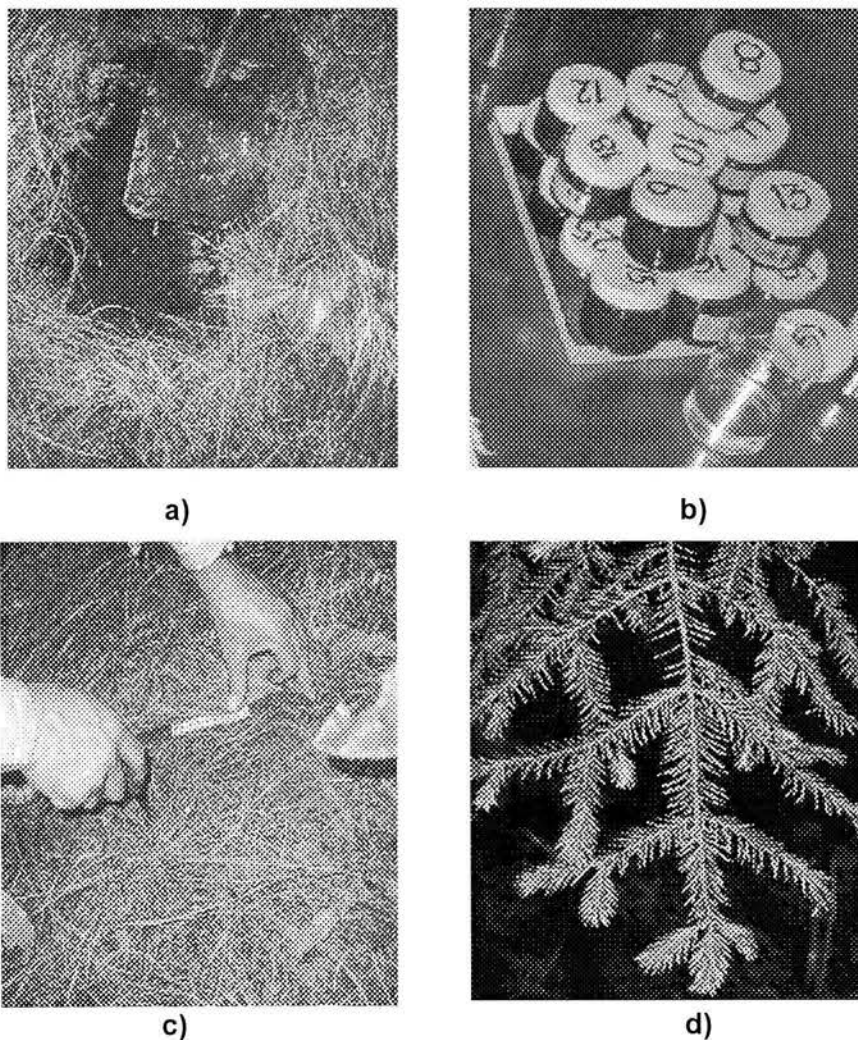


Figura 7. **a)** muestra de suelo de 0-20 cm de profundidad para análisis físico y químico; **b)** frascos de plástico conteniendo muestra de suelo de 0-10 cm de profundidad para análisis biológico y bioquímico; **c)** medición del cuadrante para obtener muestra de mantillo; **d)** ramilla de *Abies religiosa* seleccionada como muestra foliar.

### 5.3. ANÁLISIS DE LABORATORIO.

#### 5.3.1 Pretratamiento de muestras

Previo al análisis físico y químico, las muestras compuestas de suelo que provienen de una profundidad de 0 a 20 cm de profundidad se colocaron sobre papel de estraza en charolas de plástico y se dejaron secar al aire.

Ya en el Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal de la FES Zaragoza, se tamizaron con un tamiz, malla de 2 mm y se almacenaron en botes de plástico de 1 kg sellados y etiquetados, para su posterior análisis.

Las muestras compuestas obtenidas a profundidad de 0-10 cm se conservaron en refrigeración a 4°C, con la finalidad de reducir al máximo la actividad microbiana hasta el momento del análisis biológico y bioquímico. Previo a la determinación de la actividad enzimática de las fosfatasas ácidas y alcalinas, las muestras fueron secadas y tamizadas de igual forma que las muestras de 0 a 20 cm de profundidad.

Las muestras de mantillo fueron pasadas a través de un tamiz con malla de 2 mm para eliminar el suelo adherido; se pesó en una balanza granataria y se colocó en bolsas de papel, posteriormente se colocaron en una estufa marca FELISA modelo FE131 a temperatura de 70°C, hasta obtener peso constante. Una vez secas las muestras, se determinó en ellas el peso seco, se molieron en un molino Thomas Scientific (General Electric Motors) y pasaron por una malla número 20 del propio molino. Cada muestra se almacenó en botes plásticos etiquetados. Las muestras foliares contenidas en bolsas de papel se colocaron en la misma estufa a 70° C para su secado, hasta que registraron peso constante. Posteriormente se molieron con parte terminal de las ramas y se almacenaron en botes de plástico etiquetados.

#### 5.3.2 Análisis de las propiedades físicas del suelo.

- ◆ Color del suelo por comparación de las cartas Munsell (Macbeth, 1992).
- ◆ pH activo relación suelo:agua 1:2 medido con potenciómetro marca Conductronic S.A modelo 10 previamente calibrado.
- ◆ pH potencial relación suelo:solución salina de KCl 1:2 medido con potenciómetro marca Conductronic S.A modelo 10 previamente calibrado.
- ◆ Conductividad eléctrica relación suelo: agua 1:5 medido con conductímetro (SMCS, 1998).
- ◆ Textura por el método del Bouyoucos, el cual se basa en la velocidad de sedimentación de las partículas de arena, limo y arcilla y con ello conocer las porciones con que cada

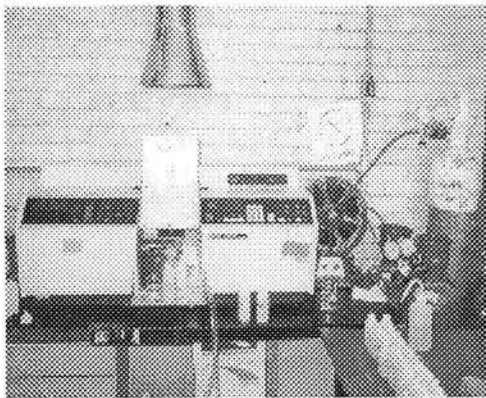


fracción participa en cada suelo y poder recurrir al triángulo de texturas del suelo para su clasificación textural (Castillo, 1999).

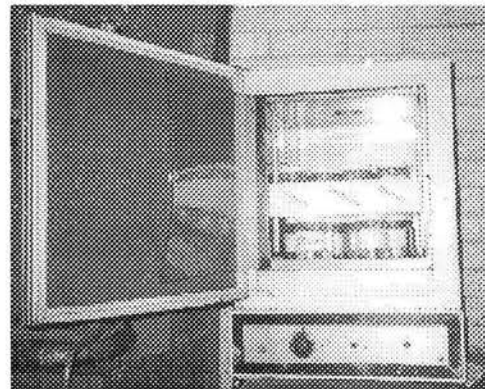
- ◆ Densidad aparente (D.A.) mediante la técnica de la probeta y Densidad real (D.R.) del suelo mediante la técnica del picnómetro (Palmer y Troeh, 1989).

### 5.3.3 Análisis de las propiedades químicas del suelo.

- ◆ Materia orgánica del suelo (MOS) método de la oxidación-vía húmeda: Walkley y Black, la cual se basa, en la reacción de la M.O. ante un agente oxidante, favorecida por la liberación de calor (Castillo, 1999).
- ◆ Cationes intercambiables extractables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ ) con acetato de amonio 1N pH 7.0 y cuantificados por espectroscopía de absorción atómica (Figura 8a) (SMCS, 1998).
- ◆ % de Nitrógeno total por medio del método semimicro-kjeldahl (Bremmer, 1965).
- ◆ Fósforo disponible mediante el método de Bray y Kurtz (SMCS, 1998).



a)



b)

Figura 8. Análisis de laboratorio; a) espectroscopio de absorción atómica utilizado para cuantificar cationes intercambiables; b) Frascos en incubación, divididos en suelo natural y suelo fumigado para determinar evolución de  $\text{CO}_2$  y calcular el carbono en la biomasa microbiana (CBM).

### 5.3.4 Análisis biológico y bioquímico del suelo.

- ◆ Actividad microbiana por evolución de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en el suelo (Figura 8b) (Powlson *et al.*, 1987).
- ◆ Población microbiana presente en el suelo mediante el método del portaobjeto de contacto o también llamado, método de Rossi y Cholodny (Atlas y Bartha, 1987).

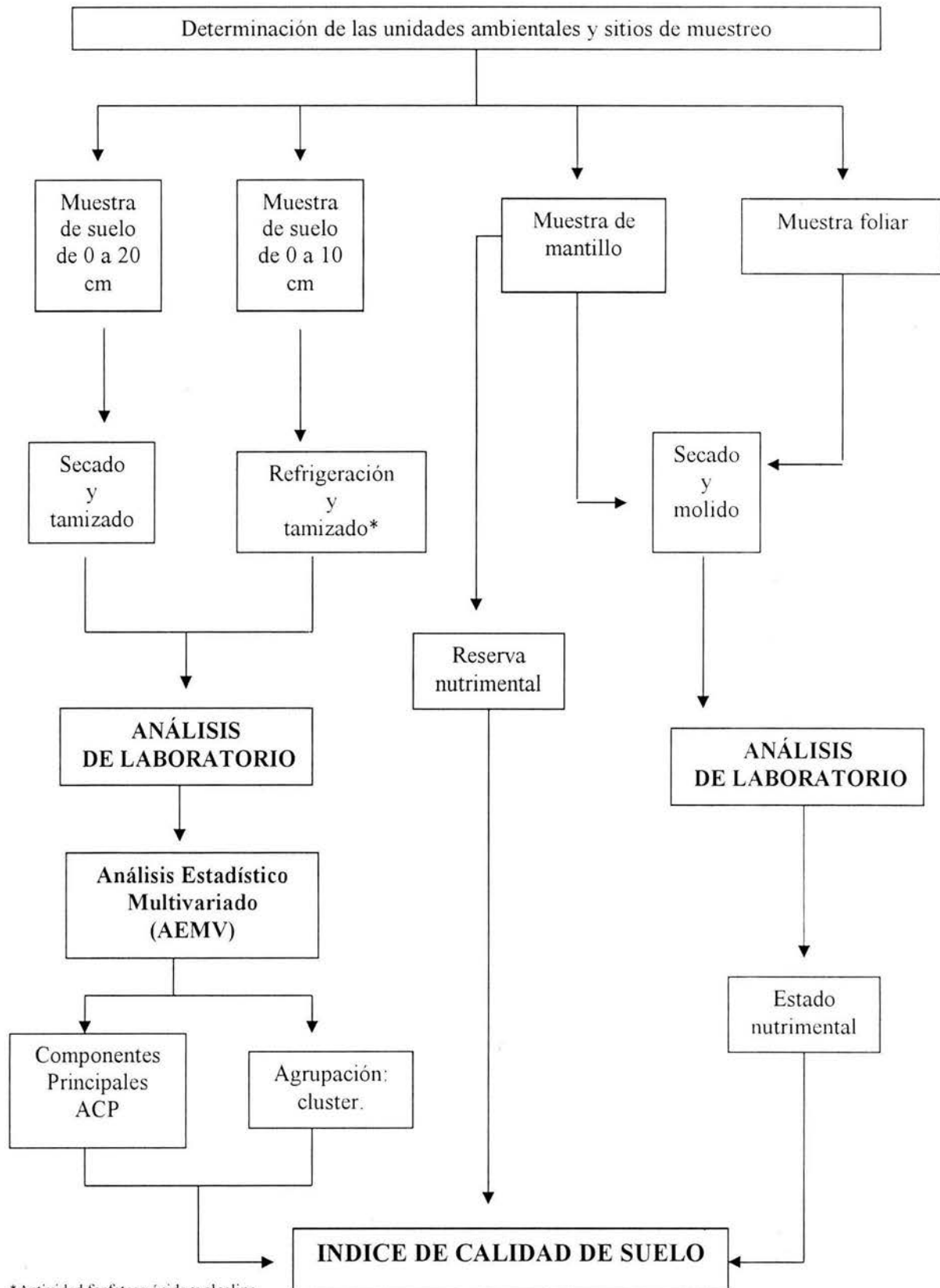
- ◆ Estimación de carbono en la biomasa microbiana por el método de fumigación-incubación (Powlson *et al.*, 1987 modificado por Cruz F. 2002). Esta técnica se basa en que, cuando un suelo se esteriliza con cloroformo y después se reinocula con una pequeña dosis de suelo fresco, las células microbianas destruidas actuarán como sustrato carbonado y durante su descomposición desprenderán, en forma de CO<sub>2</sub>, una porción de sus componentes carbonados. A partir del CO<sub>2</sub> desprendido se realiza el cálculo de la biomasa microbiana (Apéndice 3a).
- ◆ Actividad enzimática de fosfatasa ácida y alcalina por el método de p-Nitrofenilfosfato (Tabatabai, 1994) (Apéndice 3b)

#### 5.3.5 Análisis químico de mantillo y tejido vegetal.

- ◆ % de N-total mediante el método semimicro-kjeldahl (Bremmer, 1965).
- ◆ Fósforo total, mediante el método del complejo amarillo de Vanadato-molibdato (SMCS, 1998).
- ◆ Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio, mediante la extracción ácida y cuantificación por absorción atómica (SMCS, 1998).

A los datos provenientes del análisis físico, químico, biológico y bioquímico se les realizó un Análisis Estadístico Multivariado con ayuda del programa STATGRAPHICS plus 5.0.

## DIAGRAMA DE FLUJO.



## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

## 6.1 Descripción de los sitios de estudio.

En el área de estudio, se definieron 15 unidades ambientales que comprendieron 67.5 km<sup>2</sup> distribuidas entre los 2832 y 3550 msnm, en la exposición W del PN Izta-Popo. En todas las unidades se encontró una buena distribución de *Abies religiosa* tanto en laderas como en cañadas de diferente exposición, con predominio de las orientadas al sur y variable porcentaje de pendiente, esta última variable se encontró entre 4 y 80 %.

Cuadro 5. Descripción de las características generales de los sitios muestreados.

Sitio y Nombre local	Latitud _____ UTM _____	Longitud _____ UTM _____	Altitud msnm	Pendiente %	Exposición	Asociación vegetal	Grupo de suelos (INEGI 1979)
D 3 B. Las Palomas	2108542	530240	2832	16	NE	<i>A. religiosa</i> - <i>Cupresus</i>	Fluvisol eútrico
O 18 Lomas San José	2112175	531440	2932	80	NE	<i>A. religiosa</i>	Regosol eútrico + Litosol + Andosol húmico
D 11 C. Coquia	2107789	532240	2965	4	W	<i>A. religiosa</i>	Regosol eútrico + Litosol + Andosol vitrico
Las Anomias Las Anomias	2116480	530450	3000	25	W	<i>A. religiosa</i>	Andosol húmico + Litosol + Regosol districo
O 16 C. Tezozolco	2103600	530720	3225	55	S	<i>A. religiosa</i>	Andosol húmico + Litosol + Regosol districo
D 24 Techinaco chico	2106898	532351	3228	20	SW	<i>A. religiosa</i>	Regosol eútrico + Litosol + Andosol vitrico
O 1 C. La Calzada	2108833	533236	3250	65	S	<i>A. religiosa</i> , <i>P.</i> <i>montezumae</i>	Regosol eútrico + Litosol
O 2 C. Provincial	2109880	533116	3300	35	W	<i>A. religiosa</i> - zacatonal	Regosol eútrico + Litosol
Cruce el ocho NE cerro del ocho	2116750	531600	3300	25	SW	<i>A. religiosa</i>	Andosol húmico + Litosol + Regosol districo
O 15 Techinaco Grande	2106584	533082	3336	44	N	<i>A. religiosa</i>	Regosol eútrico + Litosol + Andosol vitrico
O 13 C. Amalacaxco	2111786	533785	3398	60	SE	<i>A. religiosa</i>	Regosol eútrico + Litosol
O 14 C. Coyoco	2106124	533121	3440	55	S	<i>A. religiosa</i>	Regosol eútrico + Litosol + Andosol vitrico
Coronilla Cerro Coronilla	2117782	533552	3500	35	S	<i>P. hartwegii</i> - <i>A.</i> <i>religiosa</i>	Andosol húmico+ Litosol+Regosol eútrico
F 2 Cuchilla Zumpango	2111225	534603	3520	35	SE	<i>P. hartwegii</i> - <i>A.</i> <i>religiosa</i>	Regosol eútrico + Litosol
F 11 C. Amalacaxco	2111918	534716	3550	45	E	<i>P. hartwegii</i> - <i>A.</i> <i>religiosa</i>	Regosol eútrico + Litosol + Andosol vitrico

Unidades ambientales: F <sub>faceta</sub>; D <sub>disturbio</sub>; O <sub>oyamel</sub>

Con los resultados encontrados, se considera que estos aspectos físicos del terreno no limitan el establecimiento de la especie (Cuadro 5), sin embargo, la altitud si influye en su distribución, ya que se encontró en el intervalo entre los 2800 y 3500 msnm.

Con base en lo observado en campo, se pudo corroborar para el parque nacional Izta-Popo lo expuesto por Amezcua y Valderrama (1999), quienes encontraron que ni la pendiente ni la exposición limitan la distribución de *A. religiosa* en el Parque Nacional "el Chico". Sin embargo, López (1993), al trabajar en la Sierra Nevada (Tlamacas, Tlaloc, Tulancingo, y Nevado de Toluca) encontró que la exposición NE, es la más adecuada para el crecimiento de la especie y Gómez, 1989 citado por López, 1993 encontró que la exposición N, favorece la regeneración natural.

Challenger (1998), menciona que los bosques de *Abies*, al igual que los bosques mesófilos, requieren de alto grado de humedad y prosperan con temperaturas frías, las cuales son constantes en el intervalo altitudinal en el que se encontró la especie. Los suelos sobre los que se desarrolla *Abies religiosa* en la exposición occidente de las montañas del Parque Nacional Izta-Popo, pertenecen a diversos grupos, todos caracterizados por ser suelos jóvenes (Figura 9).

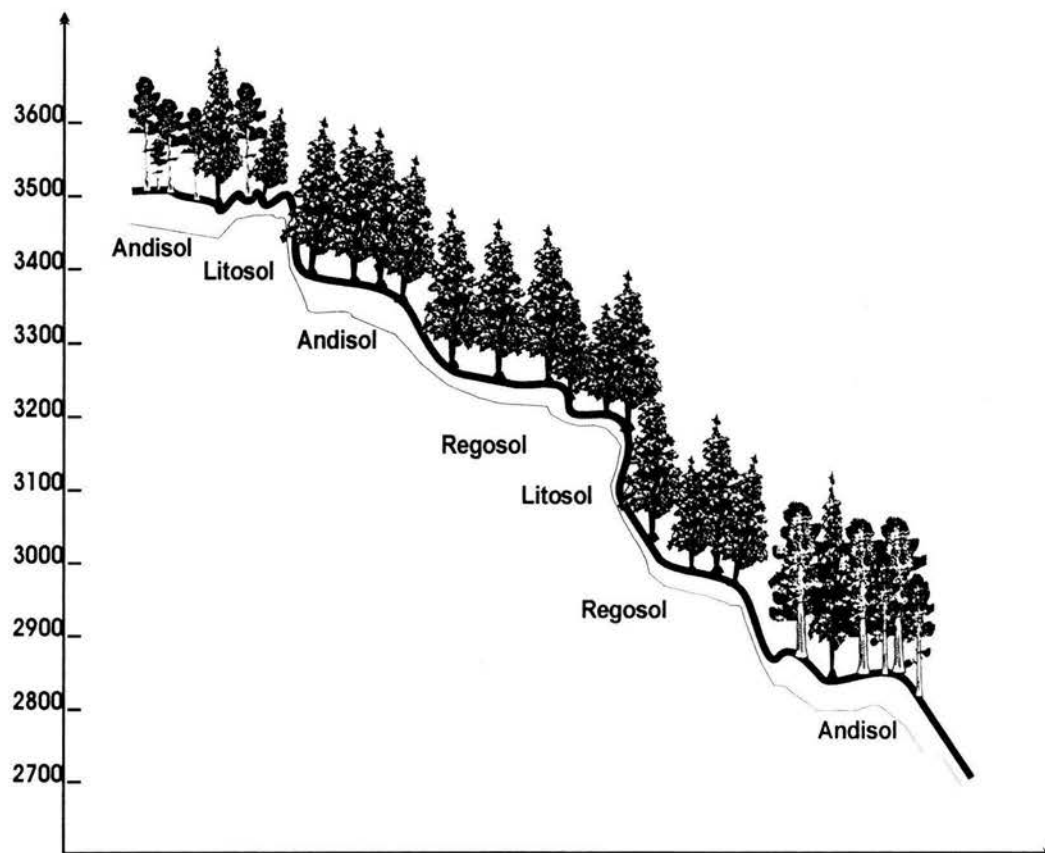


Figura 9. Distribución de *Abies religiosa* y suelos en la exposición occidente del Izta-Popo.

Entre los suelos jóvenes se observó como dominante al Regosol eútrico, presente en más del 70% de los sitios estudiados y a los Andosoles vítricos y húmicos, aunque también se observaron suelos muy jóvenes como Litosoles (recien denominados Leptosoles, WRB, 1994). En general varios grupos de suelos se encuentran inmersos en un mosaico edáfico, en cada unidad ambiental estudiada, derivado de la orografía del terreno.

## 6.2 Indicadores Físicos de calidad del suelo.

Con base en los resultados de las propiedades físicas se observó que los suelos presentaron conductividades eléctricas cuyos valores fueron entre 0.03 para la unidad ambiental denominada "Coronilla" y 0.12 dS m<sup>-1</sup> para el O1, lo que indica que distan de ser suelos salinos.

En la determinación de la densidad aparente (DA) (Cuadro 6), se encontró que son bajas, con valores dentro del intervalo de 0.86 para "Coronilla" y 1.25 g cm<sup>-3</sup> para la unidad ambiental D3 (Las Palomas). Soil Taxonomy, ha reportado que los Andosoles tienen DA cercanas a los 0.9 g cm<sup>-3</sup> o menos (Cruz, 1994 y Cruz, 2000).

Hidalgo (1988) también encontró valores de DA entre 0.72 y 1.22 g cm<sup>-3</sup> en Andosoles de la "Sierra Nevada" (D. F., Estados de México y Morelos).

Cuadro 6. Propiedades físicas de los suelos para cada sitio de estudio.

Sitio	CE	D.A	D.R.	EP	Humedad	Arcilla	Limo	Arena
	dS m <sup>-1</sup>	g cm <sup>-3</sup>				%		
D 3	0,04	1,25	2,07	39,63	3,16	4	8	88
O 18	0,10	0,99	2,18	54,51	3,62	10	24	66
D 11	0,09	0,92	2,48	62,70	2,47	6	18	76
Las Anomias	0,04	0,93	2,56	63,70	4,73	8	26	66
O 16	0,09	1,04	2,01	33,14	3,50	4	14	82
D2 4	0,10	0,98	2,51	61,13	6,75	8	20	72
O 1	0,12	0,91	2,20	58,82	4,31	6	22	72
O 2	0,06	0,99	2,06	51,94	1,65	6	22	72
Cruce el 8	0,06	1,06	2,23	52,36	3,56	8	28	64
O 15	0,08	1,09	2,23	50,96	7,30	6	20	74
O1 3	0,08	1,05	2,29	54,18	3,41	6	18	76
O 14	0,09	1,01	2,23	41,16	3,54	2	20	78
Coronilla	0,03	0,86	2,05	58,13	4,52	6	20	74
F 2	0,07	1	2,35	57,27	4,23	6	20	74
F 11	0,05	1,1	2,21	50,34	2,14	6	24	70

CE conductividad eléctrica; D.A densidad aparente; D.R. densidad real; EP espacio poroso.

Los valores para densidad real (DR) fueron encontrados en el intervalo de 2.01 a 2.56 g cm<sup>-3</sup> para los sitios O16 y "Las Anomias" respectivamente.

La humedad fue relativamente baja y se encontró entre 1.65 para la unidad ambiental O2 y 7.30 % para O15, esto puede ser explicado con base en el alto porcentaje de espacio poroso de los sitios ya que en la mayoría de ellos se encontró, a esta variable, con valores mayores al 50%. Honorato (2000) menciona que a mayor espacio poroso el contenido de humedad es menor. Con los resultados encontrados en esta investigación para contenido de humedad y porosidad se confirma lo expuesto por este autor (Cuadro 6)

La clase textural que se encontró en los suelos de las unidades ambientales estudiadas fue arena-franca y franco-arenosa, es decir, son texturas gruesas como lo indica la WRB (1994), para estos grupos de suelos.

Antes de realizar el Análisis Estadístico Multivariado (AEMV) y dadas las diferencias entre las magnitudes de cada una de las propiedad física, químicas, biológicas y bioquímicas, el programa estandariza los valores de cada variable, para lo cual les resta su media aritmética y divide entre la desviación estándar de cada una (Pérez, 1996).

Con los resultados del (AEMV), mediante la técnica de Análisis de Componentes Principales (ACP), se encontró que de 8 propiedades físicas del suelo determinadas (variable originales, VO), se obtuvieron 3 componentes principales (CP), los cuales quedaron definidos por tres variables robustas (VR) que explican el 77% de la varianza entre sitios (Cuadro 7).

Cuadro 7. CP de los parámetros físicos.

CP	Eigenvalor	Varianza	Varianza Acumulada
		%	
1	3.8336	47.979	47.979
2	1.36019	17.002	64.982
3	0.97144	12.143	77.125

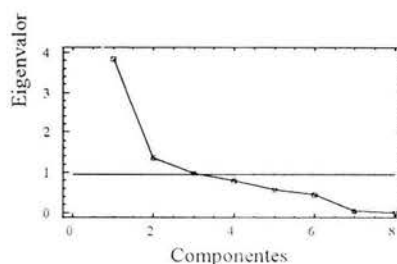


Figura 10. Dispersión de CP de propiedades físicas.

En la Figura 10 se observa la dispersión de las varianzas para los 8 componentes (propiedades físicas), y que sólo tres tienen eigenvalor mayor a 1, por lo tanto son los componentes principales (CP) que describen a la calidad física del suelo. Las (VR) por cada CP son:

CP1: -Arena, CP2: +CE + CP3: % Humedad (Apéndice 4a).



En el AEMV, de CP, aquellos que presenten signo positivo añaden características que mejoran la calidad del suelo, mientras que los de signo negativo se la restan.

De los tres componentes principales el CP1, asociado a arena (y en consecuencia a textura), presentó signo negativo dado que, en la determinación de textura, se encontró hasta 80% de arena para la unidad ambiental D3. Dicha fracción favorece la porosidad y aireación pero genera una menor CIC como consecuencia de poca proporción de arcilla, entre otras cosas.

Con estos resultados se deduce que la textura es una propiedad importante, ya que en suelos forestales influye en su productividad. Pritchett (1991), menciona que la productividad de los suelos arenosos se incrementa a medida que la porción de las otras fracciones aumenta a un nivel óptimo.

En general los tres CP encontrados para este grupo de propiedades físicas están relacionados entre sí. No son suelos salinos (CE baja), el porcentaje de humedad encontrado fue bajo pero a medida que aumentara, la calidad del suelo mejoraría y por ello los tres CP actúan sobre la disponibilidad de nutrimentos.

Del AEMV, se encontró que la fórmula que describe a cada CP es la siguiente:

$$CP1 = 0.05522 * \text{Cond-EI} - 0.3479 * \text{DA} + 0.3294 * \text{DR} + 0.4418 * \text{EP} + 0.15571 * \text{Humedad} + 0.4100 * \text{Arcilla} + 0.4177 * \text{Limo} - 0.4529 * \text{Arena}$$

$$CP2 = 0.5730 * \text{Cond-EI} - 0.1722 * \text{DA} + 0.3228 * \text{DR} + 0.1839 * \text{EP} + 0.5072 * \text{Humedad} - 0.1789 * \text{Arcilla} - 0.3367 * \text{Limo} + 0.3181 * \text{Arena}$$

$$CP3 = -0.4755 * \text{Cond-EI} + 0.5209 * \text{DA} + 0.2643 * \text{DR} - 0.0761 * \text{EP} + 0.5968 * \text{Humedad} + 0.2471 * \text{Arcilla} - 0.0971 * \text{Limo} - 0.00091 * \text{Arena}$$

NOTA: El coeficiente con mayor valor absoluto, define a cada CP.

El índice físico de calidad de suelo (IFCS) para cada uno de los sitios estudiados (Cuadro 8) se obtuvo al considerar la fórmula anteriormente planteada y la sumatoria de estos. Obteniendo así:

$$IFCS = CP1_{\% \text{ arena}} + CP2_{\text{Cond-EI}} + CP3_{\% \text{ Humedad}}$$

El IFCS es un índice parcial obtenido exclusivamente de los parámetros físicos del suelo, su contribución es de vital importancia para determinar el índice de calidad total de los suelos en cada sitio estudiado.

Doran y Parkin (1994) en Schoenholtz *et al.*, 2000; recomendaron la Textura, medida en sus tres fracciones, como un indicador físico de la calidad del suelo para ser aplicada en estos estudios; la Conductividad Eléctrica (CE) es otra de las propiedades tomada en cuenta como un indicador básico por los mismos autores.

El IFCS mayor, fue para la unidad ambiental denominada D24, la cual presentó un 72% de arena, 20% de limo y 8% de arcilla; dicha condición favorece al porcentaje de humedad que fue de 6,75%, segundo porcentaje más elevado de todos los sitios. El EP fue de 61% siendo el mayor con respecto todos los sitios. Estas condiciones físicas favorecen la aireación y la disponibilidad de nutrimentos.

Por otro lado, la unidad ambiental que presentó el menor IFCS es D3, la cual tiene -3.67883 y el signo negativo estuvo determinado principalmente por el porcentaje de la fracción textural arena ya que esta influye directamente sobre la humedad que fue de 3.16% que comparado con todos los sitios fue el menor porcentaje al igual que el EP que fue de 39.63%.

D3 es una unidad ambiental ubicada al fondo de una cañada que se caracteriza por presentar escurrimientos constantes, lo que genera que los suelos predominantes sean de tipo Fluvisol, es una zona utilizada para el pastoreo y tienen varios caminos que facilitan el acceso lo que permite la presencia de turismo. Con base en los resultados, encontramos que estos factores influyen negativamente en todas sus propiedades edáficas.

Cuadro 8. Índice físico de calidad de suelo (IFCS).

SITIO	IFCS
D24	4.98311
Las Anomias	3.57137
O 15	2.50962
F 2	0.99930
D 11	0.77697
O 1	0.75819
O 18	0.73778
Cruce el 8	0.07965
O1 3	-0.170262
Coronilla	-0.502761
F 11	-1.993885
O 14	-2.358367
O 16	-2.630675
O 2	-3.081244
D 3	-3.67883

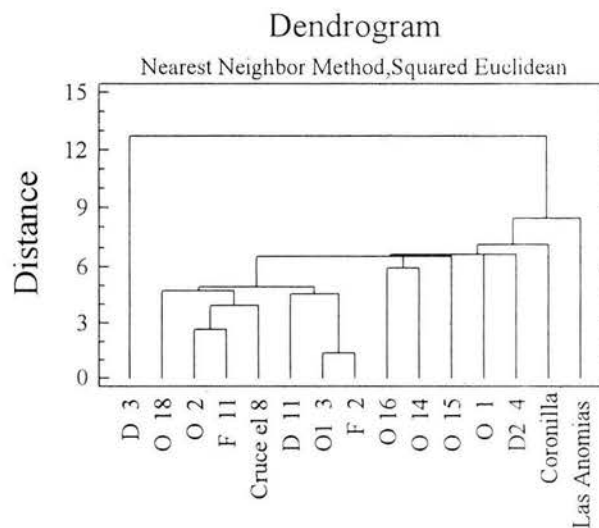


Figura 11. Similitud entre sitios de acuerdo a sus atributos físicos.

A través del Análisis de Cluster (método del vecino más cercano o menor distancia euclidiana), se encontró la similitud entre sitios, lo cual queda definido en el diagrama denominado dendrograma que muestra los quince sitios agrupados de acuerdo a la similitud entre sus características físicas (Figura 11).

Así, se encontró que las unidades O13 y F2 presentaron la menor distancia euclidiana y por tanto son semejantes entre sí. La unidad ambiental D24, en la que se encontró la mejor calidad física de suelo, se agrupó casi al final por que no se parece a la mayoría de los sitios. La unidad ambiental D3 de menor calidad edáfica con signo negativo se agrupó al final a todos los sitios y su distancia euclidiana fue la mayor por lo tanto fue la unidad ambiental que presentó una diferencia significativa en sus atributos físicos respecto a los demás sitios.

### 6.3 Indicadores químicos de calidad del suelo.

Del análisis de los parámetros químicos de suelo (Cuadro 9), los valores de pH que se encontraron están entre 5.3 para la unidad ambiental "Coronilla" y 6.79 para O18 y se encontraron en el intervalo de moderadamente ácidos, esto corresponde con los valores de pH potencial en donde la acidez extrema fluctuó entre 4.03 y 5.77 para los mismos sitios. Los resultados obtenidos corresponden con lo expuesto por Pritchett, (1991), el cual menciona que la mayor parte de los suelos forestales presentan pH en una escala de 3.5 a 6.5.

García (2003), reportó para suelos forestales bajo *Abies religiosa* en el parque nacional "El Chico" Hidalgo con diferente intensidad de incendios, valores de pH entre 5.16 a 6.23 y estos resultados concuerdan con los valores de pH encontrados para Izta-Popo.

La MOS se encontró en intervalo de 3.2% y 22% para las unidades ambientales O18 y Coronilla respectivamente la primera con pendiente de 80% y altitud de 2930 msnm y la segunda con pendiente de 35%, y altitud de 3500 msnm. Se observó una tendencia de que a mayor altitud y menor pendiente mayor contenido de MOS. La correspondencia que el porcentaje de MOS tiene con la altitud se puede explicar por que la temperatura es menor a mayor altitud e influye en la actividad microbiana del suelo y provoca una lenta descomposición de MOS (Foth, 1986). El contenido de MOS es de suma importancia en suelos forestales gracias a su papel en el almacenamiento y disponibilidad de nutrimentos.

La cantidad de fósforo disponible encontrada fue de 44 ppm en la unidad ambiental D11 y 240 ppm en O1. El fósforo disponible en la solución del suelo depende del pH, en suelos moderadamente ácidos, como los forestales, los iones ortofosfatos asimilables se encuentran disponibles para las plantas. Al igual que para el nitrógeno, la MOS es la fuente principal de abastecimiento de P para la vegetación (Tisdale, 1987 y Pritchett, 1991).

Cuadro 9. Propiedades químicas de los suelos en cada sitio de estudio.

Sitio	pH Activo	pH Potencial	<sup>a</sup> MOS	<sup>b</sup> N <sub>total</sub>	<sup>c</sup> P	<sup>d</sup> Na <sup>+</sup>	<sup>d</sup> K <sup>+</sup>	<sup>d</sup> Ca <sup>2+</sup>	<sup>d</sup> Mg <sup>2+</sup>	<sup>d</sup> Cl
	1:2		%	ppm	cmol kg <sup>-1</sup> suelo					
D 3	6,38	5,17	5,36	0,08	55,56	5,01	0,17	19,14	0,92	25.24
O 18	6,79	5,77	3,22	0,19	237,04	1,67	0,57	56,00	2,74	60.98
D 11	6,52	5,19	6,25	0,31	44,44	3,34	0,37	21,97	3,12	28.81
Las Anomias	6,34	4,9	11,52	0,22	73,33	1,51	0,49	41,82	1,04	44.87
O 16	6,2	4,99	7,48	0,05	55,56	0,72	0,40	45,36	1,20	47.68
D2 4	6,44	5,7	15,19	0,23	88,89	1,75	0,38	77,97	2,37	82.47
O 1	6,67	5,86	4,40	0,24	240,74	2,70	0,45	81,51	3,88	88.54
O 2	6,53	5,58	6,97	0,09	51,85	0,87	0,37	50,33	1,21	52.78
Cruce el 8	5,91	4,96	17,82	0,33	70,37	1,11	1,02	65,92	1,96	70.01
O 15	5,99	4,7	17,82	0,24	66,67	1,91	0,34	58,83	2,29	63.37
O1 3	6,37	5,16	9,40	0,21	148,15	0,56	0,31	36,86	1,28	39.01
O 14	6,15	5,23	8,58	0,16	129,63	1,75	0,61	43,24	1,33	46.92
Coronilla	5,36	4,03	22,78	0,30	49,63	2,07	0,26	26,23	0,88	29.43
F 2	6,03	4,65	11,46	0,21	97,04	0,64	0,43	26,23	1,34	28.63
F 11	5,4	4,2	12,11	0,22	88,89	0,95	0,27	16,30	0,81	18.34

<sup>a</sup>Walkley y Black; <sup>b</sup>Semi microkjeldhal; <sup>c</sup>Bray; <sup>d</sup>Acetato de amonio 1N pH 7.0

El Nitrógeno total, en los suelos de la exposición occidente de las montañas del Iztaccihuatl y Popocatepetl, presentó valores entre 0.08% para la unidad ambiental D3 y 0.33% para Cruce el 8; concentraciones que son adecuadas en los suelos y permiten el desarrollo de la vegetación. Pritchett, (1991), menciona que en suelos forestales el Nitrógeno es un elemento siempre disponible dado que se encuentra en gran cantidad en la MOS.

Stone y Fisher (1968); en Harold, 1984, encontraron que las concentraciones de N y P en un bosque eran mayores a niveles superiores de altitud y que las coníferas provocaban que estos se almacenaran en el mantillo y en las capas superiores del suelo.

La suma de los cationes intercambiables Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> (Cl), dio como resultado valores entre 18.3 para la unidad ambiental F11 y 88.54 cmol kg<sup>-1</sup> de suelo para O1. La unidad ambiental que presentó mayor reserva de cationes es el denominado O1 y su valor duplica al

promedio de los valores, debido a que esta unidad presentó un pH de 6.7 valor óptimo para la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes.

La capacidad de intercambio catiónico de los suelos forestales ácidos se compone sobre todo de cargas dependientes del pH. La CICT esta ligada a la fertilidad del suelo; esta propiedad contempla la suma de los cationes intercambiables disponibles en la arcilla coloidal, en partículas de humus y en la solución del suelo (complejo de cambio) (Foth, 1986)

Del grupo de cationes determinados sobresalen el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , de los cuales encontramos valores en el intervalos de 16 a 81  $\text{cmol kg}^{-1}$  y 0.81 a 3.88  $\text{cmol kg}^{-1}$  respectivamente. Dichos elementos se hallan en los suelos forestales en cantidades suficientes para el desarrollo de los árboles. Los suelos forestales poseen un grado bajo de saturación de bases, pero esto depende considerablemente del clima y de los materiales a partir de los cuales se formaron los suelos, así como de la vegetación que sostienen (Pritchett, 1991).

Con respecto al Análisis Estadístico de Componentes Principales (ACP) para las propiedades químicas, se encontró que de 10 variables originales (VO), se obtuvieron 3 componentes principales (CP), definidos por tres variables robustas (VR). Los tres CP explican en un 80.42% de la varianza entre los parámetros de todos los sitios estudiados (Cuadro 10).

En la Figura 12 se observa la dispersión de las varianzas para los 10 componentes formados a partir de las VO o parámetros químicos. El 80.4% de la varianza acumulada esta dada por tres CP los cuales poseen eigenvvalor mayor a 1.

Los CP fueron definidos por las siguientes VR.

CP1:  $\text{pH}_{\text{potencial}}$ ; CP2: MOS y; CP3:  $\text{Na}^+$  (Apéndice 4b)

Cabe señalar que el CP1 está definido en primer lugar por el  $\text{pH}_{\text{potencial}}$  pero en segundo lugar se manifiesta el  $\text{pH}_{\text{activo}}$ , por lo tanto este componente esta definido por el pH en sus dos modalidades. El CP2 y CP3 están definidos en primer lugar por la MOS y el  $\text{Na}^+$ , respectivamente, pero en ambos el  $\text{N}_{\text{total}}$  se manifestó en segundo lugar.

Cuadro 10. CP de los parámetros químicos.

CP	Eigenvalor	Varianza	Varianza acumulada
		%	
1	4.41063	44.106	44.106
2	2.38134	23.813	67.920
3	1.25022	12.502	80.422

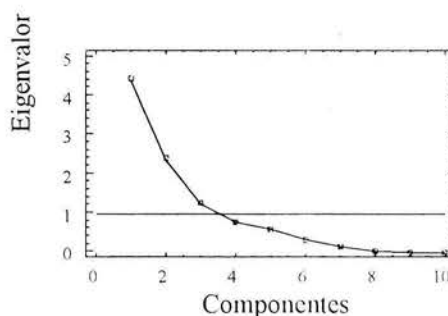


Figura 12. Dispersión de los CP químicos.

El Na<sup>+</sup> se evaluó para calcular la suma de los cationes intercambiables y se encontró para este el mayor eigenvalor en el CP3, pero el N total en este componente posee el segundo mayor peso y debido a su importancia en los procesos dinámicos del suelo, se consideró a esta variable para definir al CP3.

La fórmula que describe a cada CP es la siguiente:

$$CP1 = 0.395 \cdot pH_{\text{activo}} + 0.4404 \cdot pH_{\text{potencial}} - 0.253 \cdot MOS - 0.01972 \cdot N_{\text{Total}} + 0.3332 \cdot P + 0.04951 \cdot Na + 0.1757 \cdot K + 0.3795 \cdot Ca + 0.3790 \cdot Mg + 0.3909 \cdot CIC.$$

$$CP2 = -0.282 \cdot pH_{\text{activo}} - 0.1740 \cdot pH_{\text{potencial}} + 0.4910 \cdot MOS + 0.4751 \cdot N_{\text{Total}} - 0.01033 \cdot P - 0.2841 \cdot Na + 0.3953 \cdot K + 0.3004 \cdot Ca + 0.1173 \cdot Mg + 0.2857 \cdot CIC.$$

$$CP3 = -0.0064 \cdot pH_{\text{activo}} - 0.0664 \cdot pH_{\text{potencial}} + 0.0830 \cdot MOS + 0.5083 \cdot N_{\text{Total}} - 0.0349 \cdot P + 0.6910 \cdot Na - 0.2189 \cdot K - 0.1357 \cdot Ca + 0.4232 \cdot Mg - 0.0771 \cdot CIC.$$

Las variables robustas (VR) para las propiedades químicas determinan la fertilidad y la disposición de los nutrientes en los suelos y de acuerdo con el análisis de resultados se encontró que poseen una alta correlación, ya que los suelos forestales van de moderada a extremadamente ácidos, resultado de la liberación de ácidos orgánicos durante la descomposición de la MOS. El depósito de MOS está dado por el tipo de vegetación adaptada a las condiciones ácidas del suelo. A su vez, estas propiedades influyen directamente en la actividad microbiana y por consiguiente en la disponibilidad de los nutrientes (Pritchett, 1991).

Dalurzo *et al.*, (2001); reportaron que entre los mejores indicadores de calidad de suelo están la MOS y el nitrógeno total debido a los elevados coeficientes discriminatorios encontrados, en un experimento realizado con cuatro tipos de vegetación y diferente manejo de suelo en Misiones, Argentina. Por otro lado, existen diferentes investigaciones en las que se encontró al pH como indicador de calidad del suelo, entre ellas destaca el trabajo de Aune y Lat (1997) citado en Schoenholtz *et al.*, 2000, el cual comparó diferentes tipos de suelo y la relación con los cultivos, obteniendo para ellos diferentes indicadores de calidad. Castillo (2002), en su investigación en una huerta de aguacate *var.* Hass, encontró que el pH, CE, Ca, K, Mg y Na son los parámetros que explican la mayor variabilidad y pueden usarse como indicadores de calidad de suelo.

En el Cuadro 11 se presenta, para cada sitio, el índice químico de calidad de suelo (IQCS), el cual se obtuvo a partir de la sumatoria de los CP.

$$IQCS = CP1_{pH_{\text{potencial}}} + CP2_{MOS} + CP3_{N_{\text{total}}}$$

La unidad ambiental denominada O1 fue la que presentó el mayor IQCS, con base en el pH óptimo de 6.67 que presentó. La unidad ambiental D24 de mayor IFCS, se colocó en tercer lugar en calidad química, esto indica que puede existir una correspondencia entre los datos



para definir a las unidades de mejor calidad edáfica. La unidad ambiental de menor IQCS fue F11 con un valor de calidad de  $-3.4523$  que puede atribuirse a una baja CIC y un pH ligeramente ácido (5.4) el cual es otra de las variables robustas definidas por los CP para las propiedades químicas.

F11, localizada en la parte más elevada de la cañada Amalacaxco, fue de las unidades ambientales la de mayor altitud. Una característica importante de esta zona es el afloramiento de rocas superficiales en el suelo, (Litosol), esta característica morfológica se considera que influye negativamente sobre las propiedades químicas y resta calidad al suelo.

Cuadro 11. Índice químico de calidad de suelo (IQCS).

Sitio	IQCS
O 1	5.666332
Cruce el 8	3.746957
D2 4	3.126082
O 18	2.251811
O 15	1.731828
D 11	1.577556
O 14	-0.657984
Las Anomias	-0.806114
Coronilla	-1.111940
O1 3	-1.367342
F 2	-1.970467
O 2	-2.232056
O 16	-3.251101
D 3	-3.251109
F 11	-3.452389

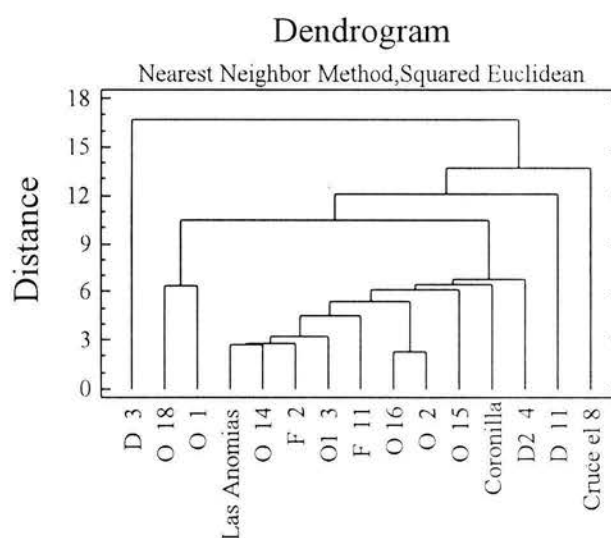


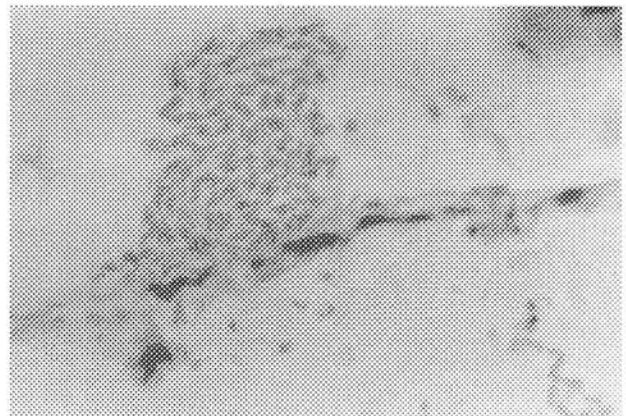
Figura 13. Similitud entre sitios de acuerdo a sus atributos químicos.

La Figura 13 muestra el dendrograma para los 15 sitios que son agrupados de acuerdo a la similitud entre sus características químicas. Los sitios O16 y O2 con base en sus propiedades químicas, son similares. D3 que se encuentra en penúltimo lugar en calidad química edáfica y que a su vez fue encontrado en el último lugar para calidad física, presentó la mayor distancia euclidiana respecto a las otras unidades. Es decir esta unidad se parece poco en sus características físicas y químicas a las demás unidades ambientales. La O1, de la mejor calidad química edáfica, se agrupa con la O18, cuarta en calidad química, y ambas se unen a la mayoría a la mitad de la mayor distancia euclidiana.

#### 6.4 Indicadores biológicos de Calidad del Suelo.

Del análisis de resultados biológicos, referidos a presencia de poblaciones microbianas, se encontró que los grupos de microorganismos, determinados cualitativamente (Cuadro 12), mejor distribuidos en todas las unidades son los hongos y las bacterias con presencia en todas las unidades, a los anteriores grupos microbianos le siguieron actinomicetos y con menor presencia el grupo de algas. La abundancia y diversidad de bacterias (Figura 14) se explica por su capacidad de crecer en ausencia o presencia de oxígeno lo que les permite intervenir en procesos importantes como la recirculación de los nutrimentos.

Figura 14. Tipo de colonia bacteriana, presente en la mayoría de las unidades ambientales estudiadas.



Por su parte, la abundancia de hongos encontrada se puede explicar por que en suelos forestales, estos organismos son los principales agentes de descomposición, debido a su tolerancia a las características ácidas del suelo.

Se sabe que sobre la densidad de las poblaciones microbianas existen factores que influyen en su desarrollo como el oxígeno, la humedad, la temperatura del suelo, niveles de nutrimentos inorgánicos y la cantidad y naturaleza de la materia orgánica. Es por ello que el grupo de algas y actinomicetos fueron encontrados en escala 0 y 1 (presencia reducida). Las algas tienden a ser raras en suelos arenosos estériles y ácidos y los actinomicetos son organismos menos comunes en regiones húmedas y en suelos con pH menor a 5 y más abundantes en los climas cálidos que en las regiones frías (Pritchett, 1991). Debido a estas influencias ambientales estos grupos no se consideran tan importantes en la descomposición de la celulosa en suelos forestales.

Entre las unidades ambientales que presentaron mayor actividad microbiana se encontró la O1 en la cual se determinó alta presencia de todos los grupos de microorganismos (escala 3) lo que también es favorecido por la MOS (4.40%). Por otro lado, la unidad ambiental que presentó menor actividad microbiana fue la O2.

La técnica cualitativa empleada, limita la estimación real de estas poblaciones microbianas y por lo tanto no permitió encontrar diferencias significativas entre los sitios de estudio.

Cuadro 12. Propiedades biológicas de los suelos en cada sitio de estudio.

Sitio	CO t ha <sup>-1</sup>	Bacterias*	Hongos*	Actinomicetos*	Algas*
D 3	77,72	1	2	1	0
O 18	36,93	2	2	1	0
D 11	66,73	3	2	1	1
Las Anomias	124,32	2	2	1	0
O 16	90,27	2	2	1	2
D2 4	172,64	3	2	1	0
O 1	46,39	3	3	3	1
O 2	80,03	1	1	1	0
Cruce el 8	219,11	2	1	1	0
O 15	225,31	2	2	3	1
O1 3	114,50	2	2	2	0
O 14	100,47	2	1	1	0
Coronilla	227,20	2	2	1	1
F 2	132,92	2	1	1	0
F 11	154,57	2	1	2	0

CO; Carbono Orgánico; 0, Ausencia; 1, presencia; 2, abundante y 3, Muy abundante.

Con respecto al análisis estadístico multivariado (AEMV) se encontró que de 4 variables originales (VO), se obtuvieron 2 componentes principales (CP), los cuales están definidos por dos variables robustas (VR); los dos CP explican en un 73.003 % la varianza entre los parámetros de todas las unidades estudiadas (Cuadro 13).

La Figura 15 muestra la dispersión de las varianzas para los 4 componentes formados a partir de las 4 VO o propiedades biológicas estudiadas. El 73.003 % de la varianza acumulada esta dada por dos CP.

Los CP fueron definidos por las siguientes VR: CP1, Hongos y; CP2, Bacterias (Apéndice 4c).

Cuadro 13. CP de los parámetros biológicos.

CP	Eigenvalor	Varianza	Varianza acumulada
1	2.04478	51.120	51.120
2	0.8753	21.884	73.003

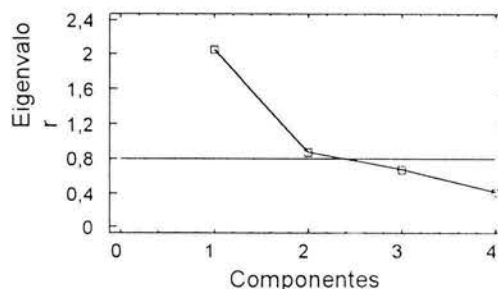


Figura 15. Dispersión de componentes principales biológicas.

La fórmula que describe a cada CP es la siguiente.

CP1= +0.490251\*Actinomicetos + 0.46085\* Algas + 0.441109\* Bacterias + 0.593881\* Hongos.

CP2= -0.135495\*Actinomicetos - 0.645791\* Algas + 0.749272\* Bacterias + 0.0564564\* Hongos.

Las poblaciones microbianas fúngicas y bacterianas destacaron por su presencia abundante en la mayoría de las unidades estudiadas y se encontró que son las VR:hongos y bacterias, las que deben estar correlacionadas con las VR químicas y físicas: MOS N-Total, pH, arena, CE y porcentaje de humedad.

En el Cuadro 14 se observa, para cada unidad, el índice biológico de calidad de suelo (IBCS), el cual se obtuvo a partir de la sumatoria de los CP obtenidos.

$$IBCS = CP1_{\text{Hongos}} + CP2_{\text{Bacterias}}$$

Se encontró que la unidad ambiental O1 fue la que tuvo el mayor IBCS, ya que presentó la mayor escala (en cuanto a presencia, 3) en todas las poblaciones microbianas estudiadas, y esto se corresponde con el IQCS dado que este sitio posee buenas condiciones de pH y adecuado porcentaje de MOS; es decir este sitio presenta condiciones edáficas que favorecen la abundancia de las poblaciones microbianas y estas a su vez la disponibilidad de los nutrimentos, la aireación, etc.

La unidad ambiental O2 presentó el menor IBCS y se corresponde con la menor presencia de las poblaciones microbianas. Esta unidad presentó como una de sus características que la asociación vegetal arbórea (*A. religiosa*-*P. pseudostrobus*) densa con dosel cerrado, además en estrato rasante predomina el zacatonal, y por lo tanto la penetración de luz se ve limitada, lo que influye sobre el crecimiento de las poblaciones microbianas y la depositación de la MOS.

Cuadro 14. Índice biológico de calidad de suelo (IBCS).

Sitio	IBCS
O 1	3,829932
O 18	2,07104
D2 4	2,07104
O 15	0,72908
O1 3	0,547232
D 3	0,065743
Las Anomias	0,065743
Coronilla	-0,233894
O 16	-0,53353
F 11	-0,5483176
Cruce el 8	-1,029805
O 14	-1,029805
F 2	-1,029805
D 11	-1,939554
O 2	-3,03511

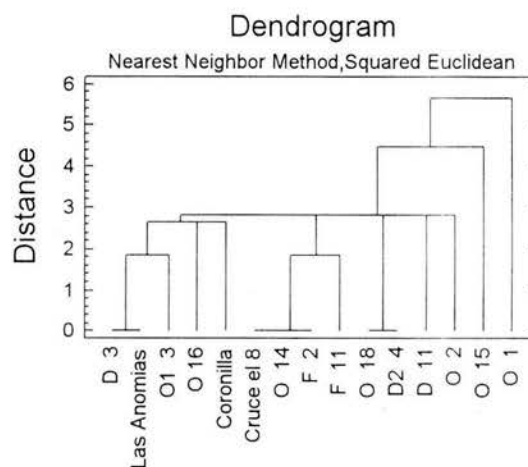


Figura 16. Similitud entre sitios de acuerdo a sus atributos biológicos.

El dendrograma (Figura 16) muestra a la unidad ambiental O1 agrupada al final de todas las unidades, esto quizá debido a que su IBCS es el más alto

### 6.5 Indicadores bioquímicos de Calidad de Suelo.

Del análisis de resultados para las propiedades bioquímicas (Cuadro 15), determinadas en cada unidad ambiental estudiada en la exposición occidente de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, se encontró que la evolución de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), resultado de la respiración y actividad microbiana (Figura 17) fue de  $5.04 \text{ kg ha}^{-1}\text{día}^{-1}$  para la unidad ambiental O2 y de  $18.55$  para O16. Las mayores cantidades de  $\text{CO}_2$  desprendidas de las unidades O1, O15, O16 y D11 O16, coincidieron con los resultados encontrados para la actividad biológica ya estos sitios tuvieron la mayor presencia de los grupos microbianos. Por otro lado los sitios con menor presencia de microorganismos y menor evolución de  $\text{CO}_2$  fueron: O2, O14, D3 y "Las Anomias".



Figura 17. Evolución de CO<sub>2</sub> determinada mediante titulación del KOH con HCl.

Cuadro 15. Propiedades bioquímicas de los suelos en cada sitio de estudio.

Sitio	CO <sub>2</sub> * kg ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup>	CBM** kg ha <sup>-1</sup>	Fosfatasa	
			alcalina μg p-NP g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	ácida
D 3	6,20	149,36	0,01331	0,04006
O 18	14,50	84,82	0,01448	0,02651
D 11	14,56	59,94	0,01987	0,04959
Las Anomías	6,08	288,67	0,01752	0,03662
O 16	18,55	86,01	0,01230	0,02995
D2 4	14,00	124,22	0,01263	0,03014
O 1	15,84	27,28	0,01297	0,02670
O 2	5,04	437,50	0,01415	0,02670
Cruce el 8	9,50	102,80	0,01684	0,03834
O 15	15,36	114,90	0,01432	0,04654
O1 3	10,17	69,67	0,01651	0,04597
O 14	6,19	141,27	0,01138	0,04120
Coronilla	6,76	235,81	0,01550	0,05074
F 2	6,55	140,72	0,01583	0,03204
F 11	8,65	297,41	0,01516	0,03166

\*CO<sub>2</sub>, bioxido de carbono; \*\*CBM, carbono de la biomasa microbiana.

La actividad biológica de los suelos, se ve influenciada por la concentración de oxígeno, contenido de humedad, la temperatura del suelo, disponibilidad de nutrientes inorgánicos y cantidad y naturaleza de la MOS. Al relacionar la influencia que tienen estas propiedades con los resultados de parámetros bioquímicos, se encontró que la unidad ambiental O1 que tuvo la



mayor evolución de  $\text{CO}_2$ , presentó la mayor calidad con base en las propiedades químicas evaluadas y que se relacionan con la disponibilidad de nutrientes. Así en general los seis primeros sitios que presentaron los mayores valores en índice de calidad física, química y biológica se encontraron entre los que mayor evolución de  $\text{CO}_2$  posee.

El carbono de la biomasa microbiana (CBM) fue estimado por el desprendimiento de  $\text{CO}_2$ , para evaluar la actividad de poblaciones microbianas, en el suelo natural y suelo fumigado–reinoculado. Con respecto a este último se observó que la respiración microbiana se incrementó al aumentar el contenido de humedad. Harris (1992) en Granados, 2000; destaca que después de la fumigación del suelo, la inoculación incrementa la respiración microbiana en formas de oleadas de  $\text{CO}_2$ . Las cantidades de CBM encontradas estuvieron entre  $27.28 \text{ kg ha}^{-1}$  en la unidad ambiental O1, y  $437.50 \text{ kg ha}^{-1}$  en O2. Ambos unidades ambientales fueron las de mayor y menor producción de  $\text{CO}_2$  respectivamente, así, estas dos propiedades se correspondieron inversamente es decir, a mayor producción de  $\text{CO}_2$ , menor CBM. (Figura 18)

Sobre los resultados de las actividades de las enzimas fosfatasa alcalina y ácida del suelo, se encontró que la actividad de la ácida es mayor que la alcalina, lo cual puede ser explicado por la naturaleza ácida de los suelos estudiados. La unidad ambiental que tuvo la mayor actividad fosfatasa ácida fue la unidad ambiental D11 y la de menor actividad fosfatasa ácida fue O14.

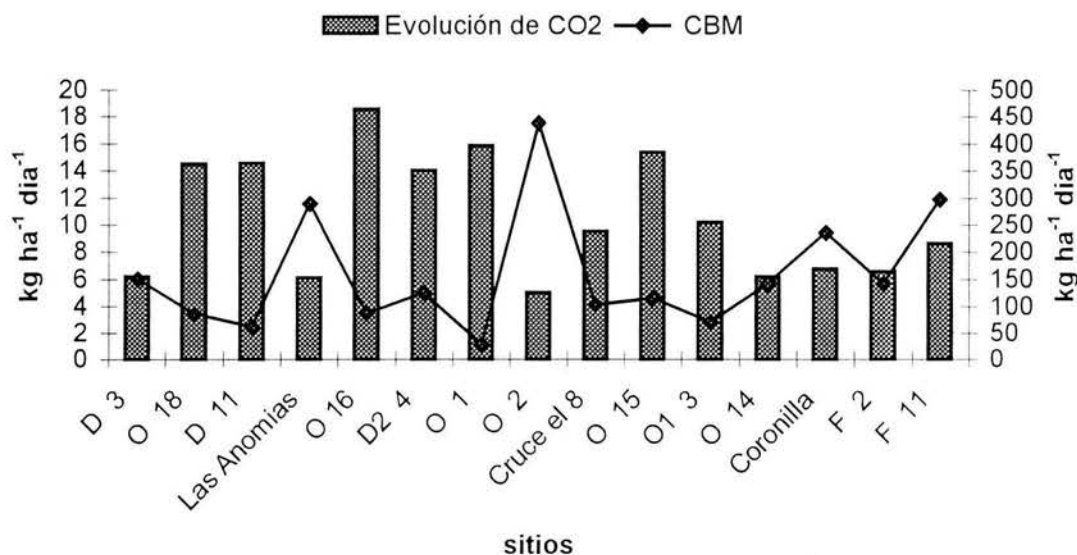


Figura 18. Relación entre la producción de  $\text{CO}_2$  y el CBM edáfico.

Debido a las unidades en las que se expresa esta propiedad ( $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) parecería que no existe diferencia significativa entre algunos sitios, en realidad las diferencias pueden ser muy significativas en cuanto a la movilización del fósforo mediante la hidrólisis de ésteres y anhídridos del ácido fosfórico; y por lo tanto en la disponibilidad de fósforo en suelos que sostienen árboles de coníferas y que contienen un nivel relativamente bajo de fósforo (Salazar, 2001 y Trasar y Carballas, 1991; citados por Reyes, 2002).

La fosfatasa es una enzima que secretan algunos microorganismos del suelo y las raíces de las plantas al encontrarse ante estrés por carencia de fósforo, de esta manera su actividad presenta una correspondencia inversa con la concentración de P disponible (Marschner, 1995).

En la Figura 19 se observa que cuanto mayor fue el fósforo disponible determinado, menor fue también la actividad fosfatásica encontrada. Se ha encontrado que el sistema radicular de vegetación de selva subtropical, en Ultisoles del sur de Misiones, Argentina deficientes en P-disponible, incrementaba la secreción de fosfatasa ácida (Ozawa *et al.*, 1995 citado por Dalurzo, 2000)

El análisis estadístico multivariado (AEMV) realizado a las cuatro variables originales (VO) bioquímicas dio como resultado dos componentes principales (CP), los cuales están definidos por dos variables robustas (VR). Los dos CP explican en 79.23% la varianza entre parámetros de los sitios estudiados (Cuadro 16).

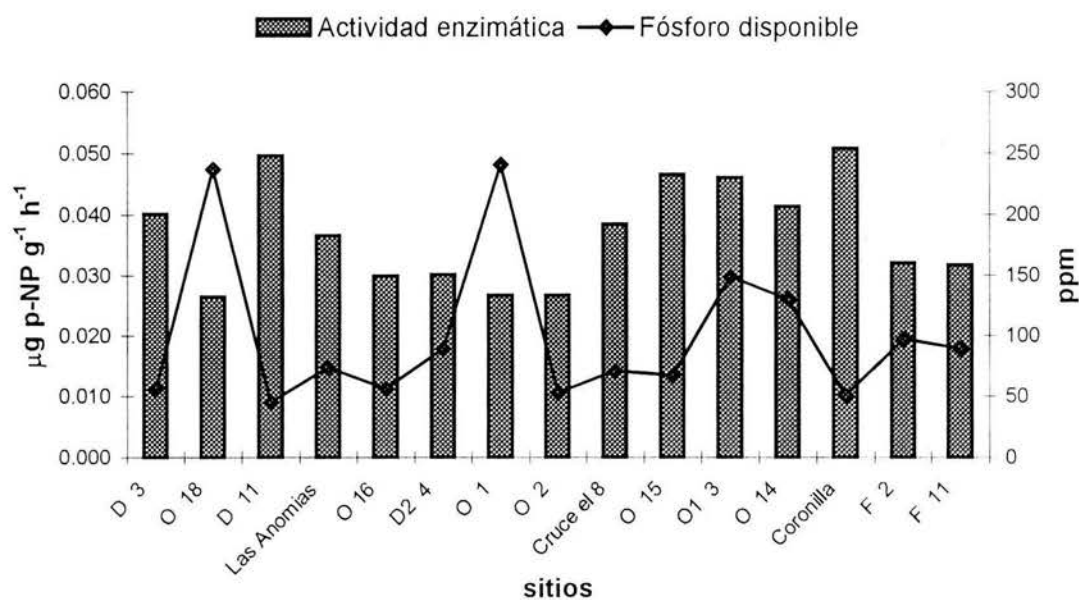


Figura 19. Relación entre fósforo disponible y actividad fosfatásica ácida.

En la Figura 20 se aprecia la dispersión de las varianzas para los 4 componentes (Parámetros bioquímicos) y sólo dos tienen eigenvalor mayor a 1 y por lo tanto son las de mayor importancia dado el peso de su información.

Las VR por CP son: CP1= CO<sub>2</sub> y CP2 = fosfatasa<sub>ácida</sub>

La fórmula que describe a cada CP es la siguiente:

$$CP1 = +0.701252 * CO_2 - 0.647097 * CBM - 0.255537 * Fosfatasa_{alcalina} - 0.155599 * Fosfatasa_{ácida}$$

$$CP2 = +0.0806058 * CO_2 - 0.329297 * CBM - 0.629202 * Fosfatasa_{alcalina} - 0.699407 * Fosfatasa_{ácida}$$

Cuadro 16. CP de los parámetros bioquímicos

CP	Eigenvalor	Varianza	Varianza acumulada
		%	
1	1.69892	42.473	42.473
2	1.47041	36.760	79.233

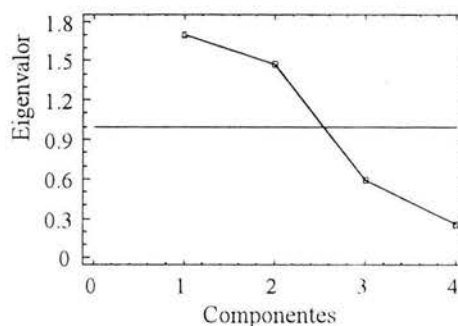


Figura 20. Dispersión de los componentes principales bioquímicos.

Las variables bioquímicas, que en el análisis estadístico son VR, contribuyen al funcionamiento del suelo en relación con la asimilación y disponibilidad de nutrientes.

En el Cuadro 17 se presenta el índice bioquímico de calidad de suelo (IBQCS) que fue obtenido a partir de:

$$IBQCS = CP1_{CO_2} + CP2_{Fosfatasa\ ácida} \text{ (Apéndice 4d).}$$

La unidad ambiental que presentó la mejor calidad bioquímica del suelo fue D11 y el de menor calidad O2. A esta última también le correspondió la menor calidad biológica.

D11 es la unidad que presentó la mejor calidad bioquímica edáfica y para los otros índices (físicos, químicos y biológicos) se encontró entre los primeros cinco mejores valores.

Del análisis del dendrograma (Figura 22) se tiene que, las unidades ecológicas con menor distancia euclidiana entre sí y por lo tanto mayor parecido entre ellas, son O1, O18, O16 y D24 y en conjunto se unen al final a todas las demás.

Cuadro 17. Índice bioquímico de la Calidad de Suelo (IBQCS).

SITIO	IBQCS
D 11	3.204612
O 15	1.743882
O1 3	1.56554
O 16	1.160749
O 1	1.109738
Cruce el 8	0.7623247
O 18	0.6089
D2 4	0.09913
Coronilla	-0.35387
F 2	-0.69068
D 3	-0.73526
O 14	-0.913845
Las Anomias	-1.501561
F 11	-1.839097
O 2	-4.18421

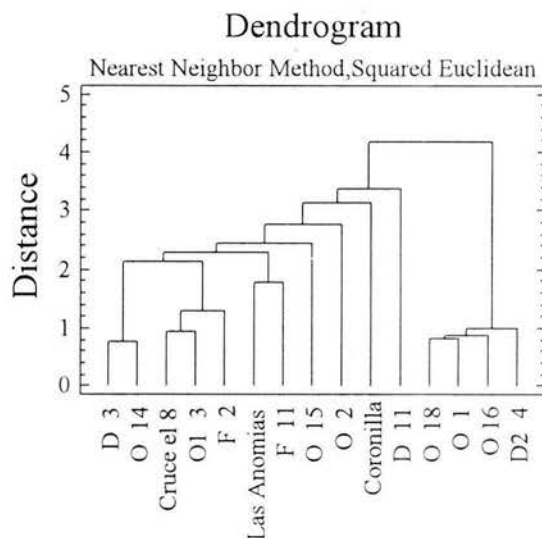


Figura 21. Similitud de los sitios de acuerdo a sus propiedades bioquímicas.

Los parámetros bioquímicos, evolución de CO<sub>2</sub> y fosfatasa ácida pueden ser buenos indicadores de calidad edáfica por que son sensibles a los cambios en el suelo. Esto coincide con lo reportado por Dalurzo *et al*, (2000) los cuales encontraron que el comportamiento de la fosfatasa ácida fue mayor en un suelo con selva subtropical, que en suelo bajo labranza convencional; por ello concluyeron que al presentar un comportamiento similar al de otros estimadores de la calidad del suelo, podría ser considerada una variable promisoría para tal fin. Además la actividad fosfatasa tiene una relación directa con otras propiedades del suelo como la MO y CO, P-disponible, con la actividad microbiana y el CO<sub>2</sub>. En un estudio sobre indicadores de calidad del suelo, Bautista, (2001) sugiere el estudio de enzimas para entender de manera más completa la dinámica de procesos en los suelos.

### 6.6 Índice total de calidad de suelo.

Como se ha mencionado, de los datos estandarizados de cada propiedad del suelo, se obtuvieron los componentes principales (CP) que definen a cada propiedad del suelo (Cuadro 18); con los que se obtuvieron los índices parciales de calidad para cada grupo de propiedades.

Cuadro 18. Resultados del AEMV en datos estandarizados de las propiedades del suelo

Propiedades	Variables originales	Número de componentes principales	Variable robusta por componente	Porcentaje de varianza acumulada por los CP
Físicas	8	3	C <sub>1</sub> = -Arena C <sub>2</sub> = +CE C <sub>3</sub> =% Humedad	77.125
Químicas	10	3	C <sub>1</sub> = pH <sub>potencial</sub> C <sub>2</sub> = MOS C <sub>3</sub> = N total	81.551
Biológicas	4	2	C <sub>1</sub> = Hongos C <sub>2</sub> = Bacterias	73.003
Bioquímicas	4	2	C <sub>1</sub> = CO <sub>2</sub> C <sub>2</sub> = Fosfatasa <sub>ácida</sub>	79.233

Con los índices parciales, se propuso un índice de calidad total para cada sitio, para ello se siguió el método planteado por Granados (2003) y Knoepp *et al.*, (2000), quienes propusieron que el índice de calidad de un sitio puede ser obtenido mediante efectos aditivos de los índices parciales con fundamento en que, como la calidad del suelo se obtuvo con datos estandarizados, se generan vectores no correlacionables ( $r = 0$ ) por lo que la variación de uno es independiente de la del otro vector y su efecto no es de interacción sino aditivo.

De esta manera se obtuvo el índice de calidad de suelo total, para todos los sitios muestreados, a partir de la sumatoria de los índices parciales de los parámetros físicos, químicos, biológicos y bioquímicos:

$$ICS_{\text{Total}} = IFCS + IQCS + IBCS + IBQCS$$

Con la ecuación anterior fueron obtenidos los índices de calidad total para cada unidad ambiental (Cuadro 19).

Se encontró que la unidad ambiental denominada O1 es la de mayor calidad edáfica. Con la suma de los índices parciales, todos de signo positivo, obtuvo un valor de 11.533. O2 y F11 fueron las unidades con los dos menores  $ICS_{\text{total}}$  con valor de  $-7.211$  y  $-7.983$ ,

respectivamente. F11 presentó en todos los índices parciales números negativos, lo que se interpreta en que dicha unidad no posee las mejores condiciones edáficas con respecto a las otras unidades de la zona de estudio.

Cuadro 19. Índice de calidad del suelo total para cada sitio de estudio.

Sitio	ÍNDICES PARCIALES DE CALIDAD DE SUELO				Índice de Calidad de Suelo <b>ICS<sub>TOTAL</sub></b>
	Físico	Químico	Biológico	Bioquímico	
O 1	0,75819	<b>5,835983</b>	<b>3,829932</b>	1,109738	<b>11,533843</b>
D2 4	<b>4,98311</b>	2,664256	2,07104	0,09913	9,817536
O 18	0,737787	3,835711	2,07104	0,6089	7,253438
O 15	2,509626	1,800116	0,72908	1,743882	6,782704
D 11	0,77697	3,257953	-1,939554	<b>3,204612</b>	5,299981
Cruce el 8	0,079652	2,7557717	-1,029805	0,7623247	2,5679434
Las Anomias	3,571375	-1,1071615	0,065743	-1,501561	1,0283955
O1 3	-0,1702621	-2,171344	0,547232	1,56554	-0,2288341
Coronilla	-0,502761	-0,86089	-0,233894	-0,35387	-1,951415
F 2	0,999307	-2,4157463	-1,029805	-0,69068	-3,1369243
O 14	-2,358367	-0,83356	-1,029805	-0,913845	-5,135577
D 3	-3,67883	-0,85123463	0,065743	-0,73526	-5,19958163
O 16	-2,630675	-3,664978	-0,53353	1,160749	-5,668434
O 2	-3,081244	3,088583	-3,03511	-4,18421	-7,211981
F 11	-1,993885	-3,601996	-0,5483176	-1,839097	<b>-7,9832956</b>

Como fue mencionado, los números negativos producen, en la suma total, reducción de calidad y los positivos aumentan dicho valor.

Destacan las unidades O1, D24, O18, O15 y D11 por haberse mantenido entre las cinco mejores unidades en todos los índices parciales y confirman este comportamiento en el ICS<sub>total</sub>.

Respecto a la relación entre la calidad edáfica y el estado nutrimental de *Abies religiosa* en la exposición occidente del PN Izta-Popo, se encontró que las concentraciones de N, P y K foliar tienen una ligera correspondencia con el ICS<sub>total</sub>.

La menor concentración del N foliar se encontró en la unidad F11, situada en el último lugar de calidad total.



Con respecto al P foliar la menor concentración fue para la unidad O2, penúltima en calidad total y la mayor concentración de P se presentó en la unidad D11, quinta mejor en calidad total edáfica.

La mayor concentración de K foliar fue para la unidad O18, la cual presentó la tercer mejor calidad total de suelo.

### 6.7 Estado nutrimental de *Abies religiosa*.

El conocimiento del estado nutrimental de especies forestales ofrece grandes retos debido a que las muestras foliares se toman en cualquier época del año y también en cualquier zona de crecimiento del árbol, lo cual no ha sido determinado por calibración o estandarización, a diferencia de plantas cultivadas.

Muchos factores influyen en la concentración de nutrimentos en tejido vegetal, algunos son inherentes a la planta misma y otros a condiciones edafoclimáticas o ambientales.

La acumulación de nutrimentos en órganos de reserva, la eficiencia de uso de nutrimentos y la edad son factores internos que determinan la concentración de nutrimentos en la planta. Por otro lado entre los factores externos está el tipo de suelo, su capacidad de suministro de nutrimentos, su temperatura, la calidad del agua del suelo, el manejo de la planta (fertilización, cultivo, densidad, presencia de agentes tóxicos, patógenos fúngicos, bacterianos y virales (Prevel *et al.*, 1987).

La disponibilidad N limita más que otro nutrimento, el desarrollo de la vegetación forestal (Månson y Falkengren-Grerup, 2003).

Del análisis químico (Cuadro 20) en tejido foliar de *Abies religiosa* del PN Izta-Popo, se encontró que el porcentaje de nitrógeno foliar, esta en el intervalo de 1.27 a 1.84 en la unidad F11 y O2 respectivamente, mientras el promedio fue de 1.5%. Del análisis de calidad del suelo total se pudo observar que a la unidad F11 que presentó el menor  $ICS_{total}$  corresponde con las menores concentraciones de N foliar.

La concentración de N en tejido vegetal oscila entre 0.5 a 5% del peso total de la materia seca, dependiendo de la especie de la planta, tipo de tejido y disponibilidad (Cruz, 2003). El fósforo es un elemento importante en la nutrición vegetal y su concentración en el tejido vegetal suele ser en promedio 10 veces menor que la que presenta el N, sin embargo se encontró que la relación N/P estuvo en el orden de más de 20 a 1 (Cuadro 20), lo cual muestra que el P en tejido vegetal está en muy baja concentración para *A. religiosa* en el PN Izta-Popo.

Cuadro 20. Estado nutrimental de tejido foliar en *Abies religiosa* en la exposición occidente del área de influencia del PN Izta-Popo.

Sitio	Contenido nutrimental					Relación nutrimental			
	P	N	K	Ca	Mg	N/P	N/K	P/Ca	Ca/Mg
	%								
D 3	0.053 b	1.409 b	1.103 a	6.364 a	0.200 b	26.550	1.416	0.210	2.028
O 18	0.074 b	1.317 b	1.630 a	1.250 a	0.112 b	27.627	1.261	0.038	9.590
D 11	0.103 b	1.330 b	1.182 a	3.523 a	0.170 b	27.896	1.261	0.028	9.877
Las Anomías	0.065 b	1.471 b	1.155 a	5.540 a	0.178 b	26.318	1.311	0.015	20.188
O 16	0.048 b	1.702 n	1.260 a	8.438 a	0.183 b	25.296	1.293	0.012	25.787
D2 4	0.064 b	1.817 a	1.120 a	6.477 a	0.176 b	25.296	1.275	0.012	26.982
O 1	0.098 b	1.407 b	1.392 a	1.676 a	0.130 b	23.138	1.259	0.011	30.790
O 2	0.048 b	1.843 a	1.168 a	9.943 a	0.206 b	22.538	1.267	0.011	30.919
Cruce el 8	0.056 b	1.573 b	1.055 a	5.653 a	0.194 b	22.764	1.278	0.010	33.175
O 15	0.061 b	1.407 b	1.088 a	8.210 a	0.192 b	22.412	1.284	0.010	33.603
O1 3	0.048	1.792 n	1.151 a	4.801 a	0.209 b	21.222	1.347	0.009	42.364
O 14	0.056 b	1.394 b	1.063 a	9.119 a	0.197 b	22.953	1.439	0.009	42.936
Coronilla	0.079 b	1.484 b	0.894 a	4.545 a	0.180 b	22.554	1.422	0.009	44.753
F 2	0.074 b	1.432 b	1.130 a	0.227 a	0.174 b	18.549	1.306	0.011	44.333
F 11	0.066 b	1.265 b	1.044 a	8.949 a	0.193 b	17.846	1.130	0.010	47.661
Promedio	0.066	1.509	1.162	5.648	0.180	23.531	1.303	0.027	29.666

N > 1.750 alto y < 1.750 bajo; P > 0.188 alto y < 0.188 bajo; K > 0.792 alto y < 0.792 bajo; Ca > 0.489 alto y < 0.489 bajo; Mg > 0.269 alto y < 0.269 bajo.

Clasificación nutrimental realizada con base en los promedios encontrados en el trabajo de López, 1993.

El contenido de P foliar promedio fue de 0.066% el cual parece ser muy bajo si se compara con el contenido de este elemento encontrado en brinzales de la especie que fue de 0.188% (López, 1993). En el PN El Chico, la concentración de P foliar encontrada por García 2003, fue de 0.083, promedio ligeramente mayor que en Izta-Popo. Moreno (1996), reportó 0.057% en promedio para brinzales estudiados bajo invernadero.

De los resultados para P foliar se obtuvo que el valor más bajo fue en la unidad O2 con 0.048 % y en D11 se encontró la mayor concentración de este elemento con 0.103%.

El contenido de P foliar más bajo, encontrado para la unidad O2, se corresponde con la baja calidad edáfica de esta unidad que tuvo el penúltimo lugar en ICS total y solo ligeramente superior a F11 unidad en la que *A. religiosa* tuvo la menor concentración de N foliar.

En referencia al contenido de nitrógeno reportado para *A. religiosa* en otras investigaciones (Cuadro 21), se encontró que los individuos de esta especie tuvieron una mayor concentración de N que los del PN el Chico, para quienes García (2003), reportó valores de 1.46%. López (1993), reportó para brinzales de esta especie provenientes de la Sierra Nevada, valores promedio de 1.75. Los valores encontrados para N en los árboles de *A. religiosa* del PN Izta-Popo presentaron menores concentraciones de N con respecto a lo reportado por dichos autores.

Cuadro 21. Estado nutricional de brinzales y adultos de *Abies religiosa* y *Abies balsamea*

Nutrimentos	López. (1993)	Moreno. 1996. Invernadero	Richardson <i>et al.</i> , (2001).	García, (2003)	García H. (2003).*
	Sierra Nevada <i>Abies religiosa</i>	Montecillos, Edo. Mex. <i>Abies religiosa</i>	USA. <i>Abies balsamea</i>	PN "El Chico" <i>Abies religiosa</i>	PN Izta-Popo <i>Abies religiosa</i>
	%				
N	1.750	1.21	1.481	1.46	1.51
P	0.188	0.057	-	0.083	0.066
K	0.792	1.32	-	3.63	1.16
Ca	0.489	-	-	5.0	5.6
Mg	0.269	-	-	0.23	0.18
		-			

\* Valores promedio encontrados en la presente investigación.

Al comparar los resultados obtenidos para P foliares, con la concentración de este elemento en el estudio realizado por López (1993), con brinzales de esta especie provenientes de la Sierra Nevada, encontramos que el nivel de P de las muestras de Izta-Popo es casi 3 veces menor. Esto puede ser atribuido a que las muestras foliares analizadas por López solo considera hojas, las cuales fueron desprendidas manualmente de la rama previo a la molienda. Con respecto a los resultados reportados por Moreno (1996), en brinzales de 9 meses de edad cultivados bajo invernadero (0.057 %), el valor se encuentra cercano al promedio obtenido en la presente investigación, el cual fue de 0.066%. Del análisis de K y Ca foliares se encontraron valores muy superiores a los reportados por López (1993). El %K coincide con lo reportado por Moreno (1996). Ambos son semejantes a los valores que fueron encontrados para esta especie

en el PN El Chico” (García 2003). Los porcentajes de K para Izta-Popo estuvieron entre 1.055 y 1.6% valores en algunos casos de casi el doble de concentración a la encontrada por López (1993) en brinzales, pero García (2003) encontró hasta 3.6% de K. El valor promedio al que se asemeja el resultado encontrado para Izta-Popo es el reportado por Moreno (1996) con 1.32%. Respecto al Ca los niveles encontrados en el PN Izta-Popo fueron excesivamente altos pues en comparación al reportado por López (1993) que fue de 0.48%, el promedio de Ca para esta zona fue de 5.6%. Por su parte García (2003) encontró un promedio de 5% de Ca en tejido foliar para la misma especie. La forma de procesamiento de la muestra pudo ser la causa de tan grandes diferencias, pues las concentraciones de nutrimentos reportados por López (1993) son exclusivamente de hoja, mientras que, tanto García (2003) como en esta investigación la muestra fue molida con parte de las ramas que las contenía. Marschner (1995), reporta contenidos de K en tejido vegetal entre 2 y 5% y para Ca contenidos entre 0.1 y > 5%. Los contenidos de Ca suelen ser altos en la pared celular (Marschner 1995), y es probable que al procesar muestras foliares con parte de la rama, los contenidos de Ca en pectatos y oxalatos de calcio suelen ser mayores respecto a las hojas.

En referencia al Mg foliar Marschner (1995), reporta que esta presenta en un intervalo de 0.15 a 0.35%. Este elemento fue encontrado en concentraciones entre 0.130 y 0.209 %. En todas las unidades ambientales que se estudiaron en el PN Izta-Popo, en comparación al contenido de Mg en brinzales de la Sierra Nevada (López, 1993), los contenidos de este elemento fueron menores. Los altos contenidos de Ca, deben ser causa del muy bajo contenido de Mg encontrado, pues el acceso del primero limita la absorción del Mg y otros cationes (Marschner, 1995).

Tomando como referencia las concentraciones nutrimentales reportadas por López (1993), se observó que el estado nutricional de *A. religiosa* en el PN Izta-Popo, para el contenido de N foliar esta en la clase de nivel nutrimental bajo (b) en todos los sitios, con excepción de O16, D24, O2 y O13, estos últimos pueden ser clasificados como nivel nutrimental alto (a) o normal (n) (Cuadro 20). Con referencia al P foliar en todas las unidades ambientales la concentración esta en la clase de nivel nutrimental bajo.

Respecto al Ca y K se encontraron valores que permiten clasificarlos en el nivel nutrimental alto y finalmente al contenido de Mg foliar se le puede clasificar en el nivel nutrimental bajo.

### 6.8 Reserva nutrimental en mantillo.

Aparte de los nutrimentos contenidos en el suelo tanto en su fracción mineral como orgánica, el mantillo es una reserva de nutrimentos a largo plazo.

En la unidad ambiental "Cruce el ocho" se encontraron las mayores cantidades de mantillo ( $267.18 \text{ t ha}^{-1}$ ) y del análisis químico en esta reserva, el porcentaje de N estuvo entre 0.58 y 1.45% con un promedio de 1.03 % para toda la zona estudiada que equivale a aproximadamente  $1.80 \text{ t ha}^{-1}$  de N potencialmente mineralizable a largo plazo (Cuadro 22). Mc Fee y Stone, 1965 citados en Pritchett (1991), reportan valores de N de  $1.2 \text{ t ha}^{-1}$  en bosques de Abedul y Abeto. Dicho valor es ligeramente bajo comparado con el promedio encontrado en esta investigación ( $1.8 \text{ t ha}^{-1}$ ).

Cuadro 22. Concentración y contenido de nutrimentos en el mantillo

Sitio	Ws $\text{t ha}^{-1}$	Nutrimentos										
		N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	CO*
		%					$\text{t ha}^{-1}$					
D 3	242.04	0.58	0.04	0.13	6.73	0.26	1.40	0.10	0.32	16.30	0.64	140.39
O 18	23.10	1.06	0.04	0.12	19.01*	0.28	0.24	0.01	0.03	4.39	0.06	13.40
D 11	158.72	0.87	0.05	0.11	8.07	0.31	1.38	0.08	0.17	12.81	0.49	92.06
D2 4	257.53	1.12	0.04	0.22	23.10*	0.23	2.89	0.10	0.57	59.48	0.60	149.37
O 2	190.59	0.87	0.05	0.20	7.59	0.23	1.66	0.10	0.37	14.46	0.44	110.54
Cruce el 8	267.18	1.45	0.04	0.12	16.36	0.25	3.87	0.11	0.31	43.72	0.67	154.97
O 15	154.43	1.00	0.05	0.10	11.36	0.30	1.54	0.07	0.16	17.55	0.46	89.57
O1 3	239.10	1.17	0.06	0.13	24.94*	0.29	2.80	0.15	0.30	59.64	0.70	138.68
O 14	158.91	1.03	0.05	0.14	10.99	0.30	1.64	0.07	0.22	17.47	0.48	92.17
Coronilla	94.4	1.23	0.03	0.09	1.73	0.13	1.17	0.03	0.08	1.64	0.12	54.75
F 2	200.19	1.01	0.04	0.10	4.89	0.27	2.02	0.08	0.20	9.78	0.53	116.11
F 11	95.74	0.98	0.05	0.09	5.31	0.21	0.94	0.05	0.09	5.09	0.20	55.53
Promedio	173.49	1.03	0.05	0.13	11.67	0.25	1.80	0.08	0.23	21.86	0.45	100.63

\* CO, carbono orgánico

En referencia al P, otro elemento esencial para las plantas, la mayor concentración en mantillo fue encontrada en O13 con 0.06% y la menor en "Coronilla" con 0.03%. En promedio la zona presentó 0.05% de P, equivalente a  $0.08 \text{ t ha}^{-1}$  ( $80 \text{ kg ha}^{-1}$ ) (Cuadro 22). En estimaciones

del contenido de P en mantillo en bosques de Abedul y Abeto, McFee y Stone 1965, citados por Pritchett, encontraron valores más altos de P ( $0.21 \text{ t ha}^{-1}$ ) a los aquí reportados.

Cuadro 22a. Relación de nutrimentos en mantillo

Sitio	N/P	C/N	C/P
D 3	13.68	100.07	1369.07
O 18	24.98	54.80	1369.07
D 11	16.42	66.71	1095.26
D2 4	30.25	51.72	1564.65
O 2	16.42	66.71	1095.26
Cruce el 8	33.78	40.03	1352.17
O 15	20.89	58.27	1216.95
O1 3	19.24	49.50	952.40
O 14	22.95	56.14	1288.54
Coronilla	35.87	46.97	1685.01
F 2	24.40	57.54	1404.17
F 11	20.39	59.02	1203.58
Promedio	23.27	58.96	1299.68

En el análisis de la proporción N:P en mantillo (Cuadro 22a), se encontró que el promedio de la zona es de 23:1, lo cual es reflejo de una muy baja concentración de P y es más marcada en la unidad "Coronilla" (35:1) y se encontró de manera aceptable para la actividad microbiana en D3 (13:1).

Las reservas de nitrógeno en el suelo, son con pocas excepciones enormes, comparadas con la cantidad contenida en la biomasa viva; sin embargo, la liberación por mineralización puede ser muy lenta (Larsson *et al.*, 1992 citado por Cruz, 2003). Dicha reserva se incrementa con la que se encuentra principalmente en el mantillo (Pritchett, 1991).

El K, otro elemento esencial, fue encontrado en concentraciones de 0.09 % para las unidades "Coronilla" y F11 y 0.22 % para D24. En promedio la zona presentó un porcentaje de 0.13, que equivale a  $0.23 \text{ t ha}^{-1}$ .



Aunque para D24, O18 y O13, se encontraron % de Ca muy altos, alrededor de 20%, las demás unidades ambientales estuvieron entre 1.7 y 16% con promedio alrededor de 8% (12.8 t ha<sup>-1</sup>).

El Mg, elemento esencial secundario, se encontró en concentraciones promedio de 0.25 % lo que expresado en t ha<sup>-1</sup> es 0.45. Al igual que en el suelo, la concentración que se encontró de Mg fue relativamente baja. La unidad ambiental que mayores porcentajes de nutrimentos en reserva tuvo fue O13 y la unidad "Coronilla" fue la que menores valores de reserva nutrimental presentó.

## 7. CONCLUSIONES.

Con base a los objetivos planteados y en los resultados obtenidos, se concluyó lo siguiente:

1. Se encontró en el parque nacional Izta-Popo, que los principales tipos de suelos sobre los que se desarrolla *Abies religiosa*, son Regosol, Andosol y Leptosol.
2. De un total de 26 propiedades del suelo evaluadas; se encontró que con las propiedades físicas: porcentajes de arena y de humedad además de CE; las químicas: pH activo y porcentajes de MOS y N-total; las biológicas: presencia de bacterias y hongos y las bioquímicas: evolución de CO<sub>2</sub> y fosfatasa ácida, se puede describir la calidad de los suelos estudiados y se proponen como indicadores de calidad edáfica dado que en el AEMV presentaron eigenvalor > 1. Estos indicadores si tienen relación con la disponibilidad de nutrimentos del suelo y posiblemente con la absorción de estos, hecha por las raíces de *Abies religiosa*.
3. Las unidades ambientales con mejor calidad fueron O1 y D24 cuyos valores de ICS<sub>total</sub> de 11.53 y 9.8 respectivamente y O2 con F11 las de menor calidad con valores de ICS<sub>total</sub> de -7.21 y -7.98 y fueron las propiedades químicas y biológicas ya señaladas las que contribuyen con mayor peso sobre el ICS<sub>total</sub>.
4. Se encontró al nitrógeno foliar entre 1.27 a 1.84% con un promedio de 1.5%. El contenido de P foliar promedio fue muy bajo (0.066%). El valor más bajo se encontró en la unidad O2 con 0.048 % y en D11 se encontró la mayor concentración de este elemento con 0.103%. Los porcentajes de K estuvieron entre 1.055 y 1.6%. Respecto al Ca los niveles encontrados fueron excesivamente altos con 5.6%. Respecto al Mg foliar fue encontrado en concentraciones entre 0.130 y 0.209 %. Los altos contenidos de Ca, pudieron ser causa del muy bajo contenido de Mg.
5. El estudio sobre estado nutricional de *A. religiosa*, indica que, en el parque nacional Izta-Popo, los contenidos de N, P y Mg foliar encontrados están en la clase de nivel nutrimental bajo (b) en todos los sitios. Respecto al Ca y K se encontraron valores que permiten clasificarlos en el nivel nutrimental alto.
6. Respecto a la relación entre calidad edáfica y estado nutricional de *Abies religiosa*, que las concentraciones de N, P y K foliar tienen correspondencia con el ICS<sub>total</sub>, dado que la menor

concentración del N foliar (0.98%) se encontró en la unidad F11, situada en el último lugar de calidad total y la de P foliar (0.03%) se encontró en la unidad O2, penúltima en calidad total y la mayor concentración de P se presentó en la unidad D11, quinta mejor en calidad total edáfica. Mientras que para el K, la mayor concentración de fue encontrada en la unidad O18, la cual está entre las tres mejores unidades en  $ICS_{total}$ .

7. La unidad ambiental que mayor porcentaje de nutrimentos en reserva tuvo fue O13 y la unidad Coronilla fue la que menores valores de reserva nutrimental presentó.

## COMENTARIOS Y SUGERENCIAS.

En la presente investigación, el trabajo de campo presenta la información para una sola época (estiaje), para continuar la investigación se sugiere se tome muestra en dos épocas del año.

Se tomó para cada unidad ambiental una muestra de mantillo por lo que se sugiere tomar submuestras para formar una muestra compuesta.

La textura, determinada mediante el método Bouyocus que tiende a incrementar el porcentaje de arena y al ser esta un indicador de calidad se recomienda que el método por el cual se determine dicha propiedad sea más preciso por ejemplo el método de la pipeta.

Se sugiere que para los parámetros biológicos se cuantifiquen las poblaciones, debido a la importancia de su información.

Las muestras foliares fueron tomadas en ramillas, dichas ramillas contienen tejido leñoso. En la molienda para preparar las muestras foliares previo a su análisis químico, dichas ramillas se molieron en su conjunto, lo que pudo interferir en los resultados.

Otro punto importante con respecto al tratamiento de las muestras foliares es el sugerir que antes de proceder a su secado estas sean enjuagadas con agua destilada para evitar que el polvo o las depositaciones por precipitación interfieran en los resultados.

El método estadístico utilizado es descriptivo y proporciona información sintetizada que ayuda a comprender el comportamiento de todos los parámetros estudiados y que para este caso ayudo a plantear un índice de calidad edáfica entre los sitios estudiados. Con este tratamiento no aprobamos ni rechazamos hipótesis, debido a la complejidad del estudio en donde no tenemos variables controladas.

## LITERATURA CITADA

- Aguilar, S. A. 1995. Retos y oportunidades de la ciencia del suelo al inicio del siglo XXI. Terra. Vol. 13 no. 1. México.
- Amezcuca C. P. Y L. H. Valderrama, 1999. Productividad de suelos con *Abies religiosa* Schl. et Cham en el P.N. "El Chico", Hidalgo. Tesis de Licenciatura Ingeniero en planeación y manejo de los recursos naturales renovables. UA Chapingo, México.
- Anaya, A. 1962. Estudio de las relaciones entre la vegetación forestal, el suelo y algunos factores climáticos en seis sitios del declive occidental del Iztaccihuatl. Tesis de licenciatura. Fac. de Ciencias UNAM. México.
- Ángeles C. E, 1998. Bases para la restauración del estrato arbóreo de los bosques mixtos templados. Tesis de Maestría. Fac. de Ciencias, UNAM, México.
- Atlas, R. M. and Bartha, R. 1987. Microbial ecology fundamentals and application. Benjamín/cummings. Publishing Company, inc.
- Bautista, C. A. A. 2001. Indicadores de calidad del suelo en tres cronosecuencias de bosque mesófilo, sierra norte, Oaxaca. Tesis M. en C. Colegio de Postgraduados. México.
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. Pp.114-1178. In: C.A. Black (ed). Methods of soil analysis. Part 2, Agronomy 9. America Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. U.S.A.
- Castillo, G. L. M. 1999. Manual de Practicas de Edafología. Laboratorio Integral de Biología IV. Manual interno Carrera de Biología FES Zaragoza UNAM; México.
- Castillo, V.A. 2002. indicadores de calidad del suelo, estado nutrimental y calidad de fruto en huertos de aguacate cv. Hass con manejo orgánico. Tesis M. en C. Colegio de Postgraduados. México.
- Challenger, A. 1998. Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México. Pasado Presente y Futuro. CONABIO, Instituto de Biología, UNAM y Agrupación Sierra Madre, S.C. México.
- Chatfield, C. y Collins, A. J. 1989. Introduction to multivariate analisis. Ed. Chapman and Hall London-New York.
- Chávez C. y Trigo B.N. 1996. Programa de manejo para el PN Iztaccihuatl y Popocatepetl. Colección ecología y planeación UAM-Xochimilco

- Cruz, F. G., 2000. Fertilidad del suelo y Nutrición vegetal: un enfoque ecológico. Biología FES Zaragoza UNAM.
- Cruz F. G., Tirado, T. J., Alcantar, G. G. Y Santizo, R. J., 2001. Eficiencia de uso en triticale y trigo en dos suelos con diferente capacidad de fijación de fósforo. Terra. 19 (1): 47-54.
- 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, M. A., M. A. Valera, C. I. Hidalgo y M. G. Tenorio. 2002. Calidad del suelo y su sustentabilidad. XX Curso diplomado Internacional de edafología "Nicolás Aguilera". Fac. de Ciencias UNAM, México.
- Johnson, E.D. 2000. Métodos Multivariados Aplicados al análisis de datos. Ed. Thomson Editores. México.
- Dalurzo, H. C., Toledo D. M. y Vázquez S. 2000. Efecto del uso del suelo sobre la actividad de la fosfatasa ácida en Ultisoles del sur de Misiones. UNNE. Argentina. En: [http://www.unne.edu.ar/cyt/2000/5\\_agrarias/a\\_pdf/a\\_021.pdf](http://www.unne.edu.ar/cyt/2000/5_agrarias/a_pdf/a_021.pdf). Consultada el 4 de septiembre de 2003.
- Dalurzo, H. C., Serial, R. C., Vázquez, S. y Ratto, S. 2001. Indicadores químicos y biológicos de calidad de suelos al sur de Misiones. UNNE Argentina. En: [http://www.unne.edu.ar/cyt/2001/5\\_agrarias/a\\_pdf/a\\_073.pdf](http://www.unne.edu.ar/cyt/2001/5_agrarias/a_pdf/a_073.pdf). Consultada el 4 de septiembre de 2003.
- Doran, J.W. y T. B. Parkin. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Ed. SSSA y ASA. Madison, Wisconsin, USA.
- Douglas L. K., Craig, A. D. y Susan S. A., 2003. Soil Quality: why and how? USDA-ARS National Soil Tilth Laboratory. Geoderma. June vol. 114 no 3. pp. 145-156.
- Eivazi, F. and M.A. Tabatabai. 1977. Phosphatases in soils. Soil Biol.. Biochem. 9:167-172.
- Escamilla, M.E. 1996. La vegetación alpina y subalpina del declive occidental del volcán Popocatepetl, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Etchevers, J.D, M. A. Bautista y M.A. Vergara. 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.
- FAO, 2002. Major soils of the world. Land and water digital media series. No. 19.



- Foth, H.D y L.M. Turk. 1986. Fundamentos de la ciencia del suelo. Ed. Compañía editorial Continental. México.
- Führer, E., 2000. Forest functions, ecosystem stability and management. *Forest ecology and management*: 132: 29-37.
- García C.J.M. 1999. Estrategias de desarrollo rural integral sustentable en la región volcánica Iztaccihuatl y Popocatepetl. Tesis M. en C. Colegio de Postgraduados, México.
- García, Q. O., 2003. Propiedades físicas y químicas de los suelos afectados por incendios, en un bosque de *Abies religiosa* del parque nacional "El Chico" Hidalgo. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM; México.
- Gaucher, G. 1971. El Suelo. Ed. Omega. España.
- Granados, D. M. R., 2003. Calidad del suelo y estado nutrimental del género *pinus* en la vertiente occidental del Iztaccihuatl y Popocatepetl. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM; México.
- Hair, J.F. Jr., Anderson R. E., Tatham R. L y William C. B. 1995. Multivariate Data analysis with readings. Ed. Prentice - Hall. Ed. 4°. USA.
- Harold W. y Jr. Hocker. 1984. Biología Forestal. Ed. AGT. México.
- Hernández C. G. 2000. Levantamiento nutricional de cultivos de maíz, en la subprovincia geográfica de mil cumbres correspondiente al Estado de México. Tesis de Licenciatura, FES Zaragoza, UNAM; México.
- Hidalgo, C.M. 1988. Caracterización y dispersión en suelos de Ando. Tesis de licenciatura, Escuela de Ciencias Químicas, UAP.
- Honorato, P.R., 2000. Manual de Edafología. Ed. Alfaomega. 4ª ed. México.
- Jackson, M.L., 1982. Análisis químicos de suelos. Ed. Omega. 4ª ed. Barcelona España.
- Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris y G.E Schuman. 1997. Soil Quality: a concept, definition and framework for evaluation. *SSSA Journal*, 61: 4-10.
- Knoepp, J. D., D. C. Coleman, D. A. Crossley Jr. and J. S. Clark. 2000. Biological indices of soil quality: an ecosystem case study of their use. *For. Ecol. and Manag.* 138: 357-368.
- López, L. M. A. 1993. Evaluación nutrimental de *Abies religiosa* en el Desierto de los Leones, D. F. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados, México.
- López R.L. 1990. El diagnóstico de suelos y plantas. Ed. Mundi-prensa, ed. 4°. México, D.F. p.p. 250-252.

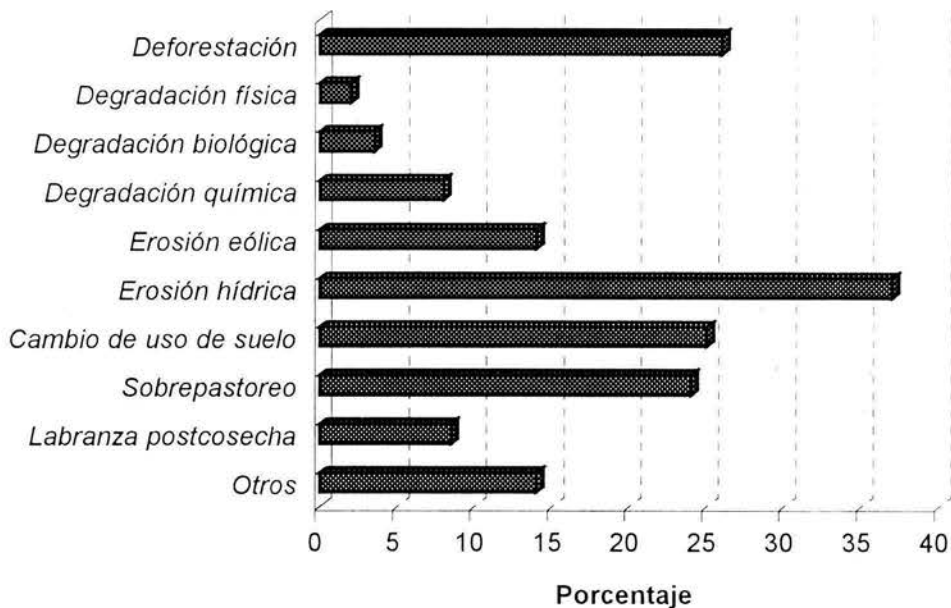
- Linden D.R., P.f. Hendrix, D.C. Coleman and P.C. J. van Vliet. 1994. Faunal indicators of soil quality. In: Doran J. W., D. C. Coleman, D.F. Bezdicek and B. A. Stenart Ed. Pp. 91-106. Deffining soil quality for a sustainable environment. SSS Inc, ASA.Inc. Madison Wisconsin, USA.
- Macbeth, 1992. Munsell Soil color Charts. New York; USA.
- Månson, K. F., U. Falkengren-Grerup. 2003. The effect of nitrogen deposition on nitrification, carbon and nitrogen mineralization and litter C:N ratios in oak (*Quercus robur* L.) forest. Forest Ecol. Management. 179: 455-467.
- Marschner, H.1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. USA.
- Mayen, L., 1987. Evaluación de los efectos de tres tipos de agua en el tiempo y porciento de germinación de semillas de oyamel (*Abies religiosa*). Tesis profesional (Ing. Agrícola). FES-Cuautitlán. UNAM. México.
- Moreno, C. R. L. 1996. Uso del DRIS para determinar necesidades de fertilización de *Abies religiosa* (H.B.K) Schl. Et Cham. en vivero. Tesis de licenciatura UA Chapingo. México.
- Niembro, R.A., 1990. Árboles y arbustos útiles de México. Ed. Limusa. 2ª ed. México.
- Nortcliff, S., 2002. Standardization of soil quality attributes. Agriculture, Ecosystems and Environment. 88: 161-168. no. 2.
- Ortega T. E. 1981. Química de suelos. Ed. UACH departamento de suelos. Chapingo, México.
- Palmer, G.R. y F.R. Truch. 1989. Introducción a la ciencia del suelo. Manual de laboratorio. Ed. AGT. México.
- Pérez, L. C. 1996. Econometría y análisis estadístico multivariable con STATGRAPHICS. Técnicas avanzadas. Ed. RA-MA. Madrid, España.
- Powlson, D. S., P. C. Brookes and B. T. Christensen, 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. Soil Biol. Biochem. 19 (2): 159-164. Great Britain.
- Prevel, P.M., J. Gagnard, P. Gautier, J. Benton Jones y M. R. J. Holmes. 1987. Plant analysis. As a guide to the nutrient requeriments of temperate and tropical crops. Lavoisier Publishing inc. New York, USA.
- Pritchett, W. L., 1991. Suelos forestales. Ed. Limusa. 2º ed. México.
- Rencher, A. 1995. Methods of multivariate analysis. Jhon Wiley and sons. USA
- Reyes, O. A. L., 2002. Calidad del suelo: Indicadores microbiológicos, propiedades bioquímicas y actividad enzimática. XX curso diplomado Internacional de edafología "Nicolás Aguilera". Facultad de Ciencias UNAM, México.

- Rzedowski, J., 1978. Vegetación de México. Ed. Limusa. México.
- Rodríguez S. 1992. Fertilizantes y nutrición vegetal. Ed. AGT editor, S.A. México, D.F. p.p 11-16 y 85-91.
- Salazar, M. A., 2001. El suelo como sistema ecológico. En: <http://progeo.hypermart.net/sueloss.htm>. Consultada el 11 de agosto de 2003.
- Salisbury, F. B. y C. W. Ross. 1994. Fisiología vegetal. Ed. Grupo editorial Iberoamerica, S.A. México, D.F. p.p 127-150.
- Sánchez C. F. y R. E. Escalante. 1984. Hidroponía. Un sistema de producción de plantas. Ed. Universidad Autónoma de Chapingo. Ed, 2°. México. p.p. 19-23 y 153-161.
- Santamarina, S. P., García, B.F., Roselló, C. J. y Vilella, F. V., 1997. Biología y Botánica (tomo I y II). Ed. Servicio de Publicaciones. España.
- SARH, 1992. Expedientes económicos de los Parques Nacionales.
- Schoenholtz S. H., H. Miegroet van., J. A. Burguer. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. For. Ecol. Manage. 138: 335-356.
- SEMARNAT, 2000. Indicadores para la evaluación del desempeño ambiental. Secretaria de medio ambiente y recursos naturales. Reporte 2000. México, D. F.
- SEMARNAT, 2001. Diario Oficial de la Federación. NORMA Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2001, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en riesgo. Marzo 6 de 2002. México D.F.
- Smith J.L., R.I. Papendick, D.F. Bezdicek and J.M. Linch. 1993. Soil organic matter dynamics and crop residue management. In: Meeting F.B. pp. 65-94. Soil Microbial Ecology. Applications in agricultural and environmental management. Marcel Dekker, Inc New York, USA.
- Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (SMCS). 1998. Manual de Procedimientos Analíticos para Análisis de Suelos y Plantas del Laboratorio de Fertilidad de Suelos. IRENAT-Colegio de Postgraduados. México.
- Soil Improvement Committee California Fertilizer Association (SICCFA). 1995. Manual de fertilizantes para horticultura. Ed. Limusa. México, DF.
- Soil Survey Staff (SSS). 1999. Keys to soil taxonomy. USDA-NRCS 9° edition. US government printing office. Washington, D.C.
- Spurr, H., 1982. Ecología Forestal. Ed. AGT. México.
- Sumner, M. E. 2000. Handbook of Soil Science. Ed. CRC press. USA.

- Tabatabai, M. 1994. Soil Enzymes. In R. W. Weaver, J. S. Angle and P. S. Bottomley. 1994. Methods of soil Analysis. Part 2. Microbiological and biochemical Properties. soil science of America. USA.
- Tamhane, R.V. 1978. Suelos: su química y fertilidad en zonas tropicales. Ed. Diana. México.
- Tisdale L. S. y W. L. Nelson. 1988. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Ed. UTEHA. México D. F.
- Urbano T.P. y C. Rojo. 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Ed. Mundi-Prensa. España.
- USDA-NRCS, 1996. Indicators for soil quality evaluation. En [http://soils.usda.gov/sqi/files/sqthr\\_2.pdf](http://soils.usda.gov/sqi/files/sqthr_2.pdf). Consultada el 29 de julio de 2003.
- USDA-NRCS, 1998. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Departamento de agricultura, Servicio de recursos naturales e instituto de calidad de suelos. Traducido al español por: Alberto Lutens y Juan Carlos Salazar. Argentina. En: <http://soils.usda.gov/sqi/files/kitspanish.pdf>. Consultada el 11 de agosto de 2003.
- USDA-NRCS, 2001. What is soil quality. En: [http://soils.usda.gov/sqi/quality/what\\_is/index](http://soils.usda.gov/sqi/quality/what_is/index). Consultada el 11 de agosto de 2003.
- Vargas M. F. 1984. Parques Nacionales de México y Reservas Equivalentes. Pasado, presente y futuro. Colección: Grandes problemas Nacionales. Serie: Los Bosques de México. Instituto de Investigaciones Económicas. UNAM. México,
- World Reference Base of Soil Resources (WRB). 1994. International Society of Soil Science. International Soil Reference and Information Centre. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Young, R. A. 1991. Introducción a las ciencias forestales. Ed. Noriega Editores. México.

# APÉNDICE

(Apéndice 1). **Tipos y causas de degradación en México.**



Fuente: SEMARNAP, 1999. La evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre. Inventario Nacional de Suelos. Dirección General de Restauración y Conservación de suelos. En: Indicadores para la evaluación del desempeño ambiental. Reporte 2000. SEMARNAT.

(Apéndice 2). **Etiqueta de datos recabados en cada sitio de muestreo.**

Fecha: _____	Lugar: _____	Faceta: _____
Altitud: _____	Latitud: _____	Longitud: _____
Exposición: _____	Pendiente: _____	
Vegetación dominante: _____		



**Facultad de Estudios Superiores Zaragoza**  
**Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal**

(APÉNDICE 3a)

**Evolución de Bióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)***Procedimiento:*

1. Hacer pasar suelo fresco (con la humedad que presenta en campo) por una malla de 2 mm de abertura para eliminar restos orgánicos.
2. Separar la muestra en dos fracciones, 1 (suelo para fumigar) y 2 (suelo natural) pesando 20 g para cada fracción y colocarlas en frascos de vidrio con tapa hermética.
3. A la fracción 1, se le adicionan 5 mL de cloroformo y a la 2, 5 mL de agua esterilizada, se cierran y se mantienen así por 48 h. Terminada la fumigación, se abren los frascos y se colocan en baño maría a 40 °C, hasta que el cloroformo se elimine. Ambos suelos (fumigado y natural) se reinoculan con 1 g de suelo natural.
4. A las dos fracciones se les agrega la cantidad necesaria de agua para llevar las muestra a capacidad de campo.  
*Notas: El suministro de agua se hará mL por mL. Las muestras del mismo lugar, deben llevar la misma cantidad de agua.*
5. Se introduce en cada frasco un tubo de ensaye que contenga 7 mL de KOH 0.5 N y una tira de papel filtro procurando que la longitud de ésta sea ligeramente mayor que la del tubo.
6. Colocar para corrección de la normalidad, un blanco absoluto (frasco que contenga un tubo con sólo 7 mL de KOH 0.5 N). Hacer esto por duplicado.
7. Cerrar los frascos e incubar entre 35 y 37 °C, por el tiempo establecido previamente por el analista (10, 20, etc. días).
8. Al término de la incubación sacar los frascos de la estufa. Sacar el tubo de ensaye y transferir todo su contenido en un matraz Erlenmeyer de 50 mL. Enjuagar el tubo con 1 mL de agua libre de CO<sub>2</sub>.
9. Colocar 2 o 3 gotas de fenolftaleína como indicador y proceder a titular con HCl 0.5 N. Incluir un blanco de titulación.
10. Realizar los cálculos para determinar los mg de CO<sub>2</sub> producidos y de carbono en biomasa microbiana.

*Cálculos:*

Calcular los miliequivalentes de KOH en el blanco y en las muestras problema.

**(Normalidad del ácido)(mL gastados en la titulación) = meq KOH**Obtener los miliequivalentes de KOH transformados en K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.**meq blanco – meq muestra = meq K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>**

Igualar unidades a equivalentes químicos.

**meq K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> / 1000 = eq K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>**A partir de esto, obtener gramos de K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> formados.**(eq K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)(PM K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> / # H sust) = g de K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>**Por estequiometría se obtienen los miligramos de CO<sub>2</sub>.**[(g de K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) (PM CO<sub>2</sub>) / PM K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>] 1000 = mg CO<sub>2</sub>**

Por último obtener el peso del carbono en la biomasa microbiana (CBM).

**(mg CO<sub>2</sub> suelo fumigado - mg CO<sub>2</sub> suelo natural) / 0.45 = CBM mg**

**Facultad de Estudios Superiores Zaragoza  
Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal**

(APÉNDICE 3b)

**Actividad fosfatásica en suelo***Reactivos:*1 **Tolueno** (reactivo certificado).2 **Buffer Universal Modificado MUB Solución Stock:**

Disolver 12.1 g de TRIS (hidroximetil) aminometano (THAM), 11.6 g de Ácido maleico, 14 g de Ácido cítrico y 6.3 g de Ácido bórico en 488 mL de NaOH 1N y diluir la solución a 1 L con agua desionizada. Guardar en refrigerador.

3 **Buffer Universal Modificado MUB, pH 5.5** (Fosfatasa ácida) y **pH 11** (fosfatasa alcalina).

Tomar y colocar 200 mL de MUB (solución STOCK) en un matraz aforado 1000 mL. Introducir una barra magnética y colocar en un agitador magnético. Llevar la solución a pH 5.5 o a 11 con HCl 0.1N o NaOH 0.1N para los ensayos de fosfatasa ácida o alcalina respectivamente. Guardar en refrigerador

4 **Solución de p-Nitrofenil fosfato 3 mM.**

Para 50 mL de solución: Disolver, la cantidad apropiada de sal disódica de p-Nitrofenil fosfato tetrahidratada en 40 mL de MUB, pH 5.5 u 11 para ensayos de fosfatasa ácida o alcalina respectivamente, aforar la solución con MUB del mismo pH. Guardar en refrigerador.

5 **Cloruro de calcio 0.5 M.**

Disolver 73.5 g de  $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  en cerca de 700 mL de agua y diluir a un volumen de 1 L con agua. Guardar en refrigerador.

6 **Hidróxido de sodio 0.5 M**

Disolver 20 g de NaOH en cerca de 200 mL de agua y diluir la solución a 1 L de agua. Guardar en refrigerador.

7 **Solución ESTANDAR de p-Nitrofenol.**

Disolver 1 g de p-Nitrofenol en cerca de 70 mL de agua y diluir la solución a 1 L de agua. Guardar en refrigerador.

*Procedimiento:*

Colocar 1 g de suelo en un Mortero.

Adicionar 0.2 mL de tolueno y 2 mL de MUB pH 5.5 u 11

Agregar unos granos de arena de cuarzo y macerar hasta homogeneización

Tomar alicuota de 0.3 mL de homogeneizado y colocarla en tubos o frascos para incubación

Adicionar 4 mL de MUB pH 5.5 u 11

Agregar 1 mL de p-Nitrofenilfosfato 3 mM

Tapar e incubar en Baño María a 37 °C durante 1 h

Remover el tapón y agregar 1 mL de  $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  0.5 M

Adicionar 4 mL de NaOH 0.5 M

Agitar y filtrar la suspensión con papel Whatman No 2

Leer a 400 nm y comparar la actividad enzimática con base en una curva de calibración que contenga 0, 10, 20, 30,40 y 50 µg de p-Nitrofenol.

**CURVA DE CALIBRACIÓN***Para preparar esta curva:*

Coloque 1 mL de la solución estándar de p-Nitrofenol en matraz volumétrico de 100 mL y después de aforar con agua, mezcle fuertemente.

De ésta última solución de p-Nitrofenol, pipetear alicuotas de 0, 1, 2, 3, 4 y 5 mL .

Ajustar el volumen a 5 mL con adición de agua y proceder a incubar como cualquier otra muestra (Agregar 1 mL de  $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  0.5 M y 4 mL de NaOH 0.5 M).

Aforar a 50 mL, mezclar y filtrar la suspensión resultante.

Si la intensidad del color del filtrado en las muestras excede la de los 50 µg de p-Nitrofenol; una alicuota del filtrado puede ser diluida con agua hasta que el colorímetro pueda leer dentro de los límites de la curva de calibración.

APÉNDICE 4a. AEMV DE PROPIEDADES FÍSICAS

análisis de componentes principales

Analysis Summary

Data variables:

- Cond\_El
- DA
- DR
- EP
- Humedad
- Arcilla
- Limo
- Arena

Data input: observations  
 Number of complete cases: 15  
 Missing value treatment: listwise  
 Standardized: yes

Number of components extracted: 3

Principal Components Analysis			
Component Number	Eigenvalue	Percent of Variance	Cumulative Percentage
1	3.8983e	47.973	47.973
2	1.36019	17.002	64.982
3	0.97144	12.143	77.125
4	0.769767	9.622	86.747
5	0.5752e	7.191	93.938
6	0.435673	5.44e	99.384
7	0.0482922	0.61e	100.000
8	6.8e332E-17	0.000	100.000

The StatAdvisor

This procedure performs a principal components analysis. The purpose of the analysis is to obtain a small number of linear combinations of the 8 variables which account for most of the variability in the data. In this case, 3 components have been extracted, since 7 components had eigenvalues greater than or equal to 0.95. Together they account for 77.1249% of the variability in the original data.

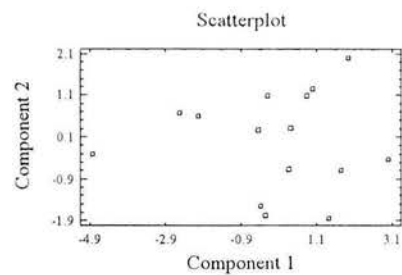


Table of Principal Components

Row	Label	Component 1	Component 2	Component 3
1	D 3	-4.81255	-0.30126	1.43498
2	O 18	1.74129	-0.695144	-0.308359
3	D 11	0.84488	1.07706	-1.14497
4	Las Anomias	3.00251	-0.433525	1.00239
5	O 16	-2.51485	0.681046	-0.796871
6	D2 4	1.92227	1.98308	1.07176
7	O 1	0.986	1.24905	-1.47686
8	O 2	-0.402634	-1.56592	-1.11269
9	Cruz de B	1.41447	1.8373	0.502492
10	O 15	-0.200694	1.08476	1.62556
11	O1 3	-0.454664	0.272866	0.0115359
12	O 14	-2.01588	0.611955	-0.954442
13	Coronilla	0.347766	-0.663657	-0.19687
14	F 2	0.401864	0.306501	0.290943
15	F 11	-0.259772	-1.77552	0.341407

The StatAdvisor

This table shows the values of the principal components for each row of your data file. Select Component Weights from the list of Tabular Options to obtain the equations for each component. Select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options to plot this data. You may save the components by pressing the fourth button from the left on the analysis toolbar.

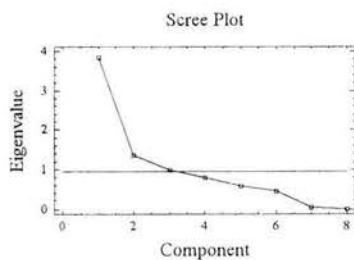


Table of Component Weights

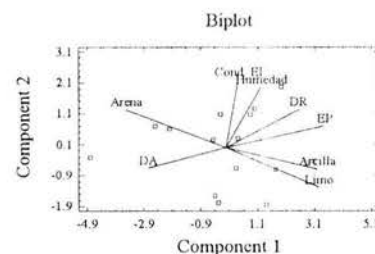
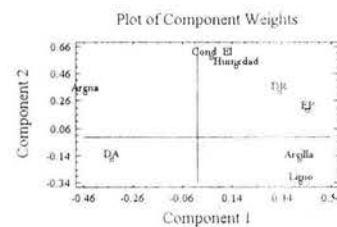
	Component 1	Component 2	Component 3
Cond_El	0.0552203	0.573079	-0.475508
DA	-0.347974	-0.172241	0.520998
DR	0.329443	0.322801	0.264324
EP	0.4418	0.183945	-0.0761776
Humedad	0.155711	0.507209	0.596877
Arcilla	0.410092	-0.178973	0.24715
Limo	0.417756	-0.356732	-0.097143
Arena	-0.452993	0.318113	-0.000915284

The StatAdvisor

This table shows the equations of the principal components. For example, the first principal component has the equation

$$0.0552203 \cdot \text{Cond\_El} - 0.347974 \cdot \text{DA} + 0.329443 \cdot \text{DR} + 0.4418 \cdot \text{EP} + 0.155711 \cdot \text{Humedad} + 0.410092 \cdot \text{Arcilla} + 0.417756 \cdot \text{Limo} - 0.452993 \cdot \text{Arena}$$

where the values of the variables in the equation are standardized by subtracting their means and dividing by their standard deviations.



### Análisis Cluster

#### Analysis Summary

##### Data Variables:

Cond\_El  
DA  
DR  
EP  
Humedad  
Arcilla  
Limo  
Arena

Number of complete cases: 15  
Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)  
Distance Metric: Squared Euclidean

Cluster	Members	Percent
1	15	100.00

##### Centroids

Clust er	Cond_El	DA	DR	EP	Humed ad	Arcil la	Limo	Aren a
1	0.07357 58	1.01 2	2.244 74	53.66 36	3.925 85	6.133 33	20.26 67	73.6

#### The StatAdvisor

This procedure has created 1 cluster from the 15 observations supplied. The clusters are groups of observations with similar characteristics. To form the clusters, the procedure began with each observation in a separate group. It then combined the two observations which were closest together to form a new group. After recomputing the distance between the groups, the two groups then closest together were combined. This process was repeated until only 1 group remained. To specify the number of final clusters, press the alternate mouse button and select Analysis Options. To determine a reasonable value for the number of clusters, look at the Agglomeration Distance Plot available from the list of Graphical Options.

#### Agglomeration Schedule

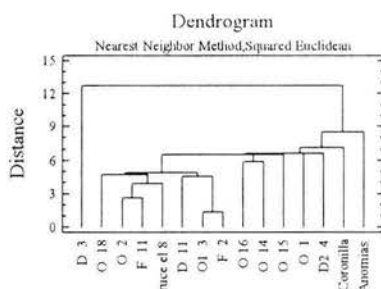
Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)  
Distance Metric: Squared Euclidean

Stage	Clusters Combined		Stage Coefficient	First Appears		Next Stage
	Cluster 1	Cluster 2		Cluster 1	Cluster 2	
1	11	14	1.35157	0	0	4
2	8	15	2.66665	0	0	3
3	8	9	3.86552	2	0	5
4	3	11	4.53602	0	1	6
5	2	8	4.70555	0	5	6
6	2	3	4.90594	5	4	8
7	5	12	5.80086	0	0	8
8	2	5	6.46849	6	7	8
9	2	10	6.47725	8	9	10
10	2	7	6.57130	9	8	11
11	3	6	6.61736	10	8	12
12	2	13	7.14494	11	0	13
13	2	4	8.46694	12	0	14
14	1	2	12.7141	0	13	0

Cluster Number	Smallest Row
1	1

#### The StatAdvisor

The agglomeration schedule shows which observations were combined at each stage of the clustering process. For example, in the first stage, observation 11 was combined with observation 14. The distance between the groups when combined was 1.35157. It also shows that the next stage at which this combined group was further combined with another cluster was stage 4.



#### Membership Table

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)  
Distance Metric: Squared Euclidean

Row	Label	Cluster
1	D 3	1
2	O 18	1
3	D 11	1
4	Las Anonias	1
5	O 16	1
6	D2 4	1
7	O 1	1
8	O 2	1
9	Cruce el 8	1
10	O 15	1
11	O 1	1
12	O 14	1
13	Coronilla	1
14	F 2	1
15	F 11	1

#### The StatAdvisor

This table shows which cluster each observation belongs to. To plot these results, select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options.

APÉNDICE 4b. AEMV DE PROPIEDADES QUÍMICAS

Principal Components Analysis

Analysis Summary

Data variables:  
 pHActivo  
 pHPotencial  
 MOS  
 NTotal  
 P  
 Na  
 K  
 Ca  
 Mg  
 CIC

Data input: observations  
 Number of complete cases: 15  
 Missing value treatment: listwise  
 Standardized: yes

Number of components extracted: 3

Principal Components Analysis			
Component Number	Eigenvalue	Percent of Variance	Cumulative Percentage
1	4.41063	44.106	44.106
2	2.98134	29.813	73.920
3	1.25022	12.502	86.422
4	0.795422	7.954	94.376
5	0.608354	6.084	94.460
6	0.342572	3.426	97.885
7	0.152604	1.526	99.411
8	0.0402028	0.402	99.813
9	0.0186566	0.187	100.000
10	2.94394E-16	0.000	100.000

The StatAdvisor

This procedure performs a principal components analysis. The purpose of the analysis is to obtain a small number of linear combinations of the 10 variables which account for most of the variability in the data. In this case, 3 components have been extracted, since 7 components had eigenvalues greater than or equal to 1.0. Together they account for 80.4219% of the variability in the original data.

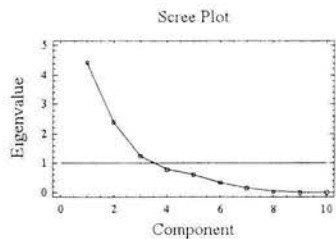


Table of Component Weights

	Component 1	Component 2	Component 3
pHActivo	0.395535	-0.282722	-0.00646009
pHPotencial	0.4404	-0.174035	-0.0664148
MOS	-0.253352	0.491038	0.0830696
NTotal	-0.0197261	0.475117	0.50837
P	0.333208	-0.0103375	-0.0349527
Na	0.0495159	-0.264176	0.691024
K	0.175727	0.395399	-0.218901
Ca	0.379598	0.300457	-0.135727
Mg	0.379076	0.117071	0.423296
CIC	0.390987	0.285782	-0.0771513

The StatAdvisor

This table shows the equations of the principal components. For example, the first principal component has the equation

$$0.395535 \cdot \text{pHActivo} + 0.4404 \cdot \text{pHPotencial} - 0.253352 \cdot \text{MOS} - 0.0197261 \cdot \text{NTotal} + 0.333208 \cdot \text{P} + 0.0495159 \cdot \text{Na} + 0.175727 \cdot \text{K} + 0.379598 \cdot \text{Ca} + 0.379076 \cdot \text{Mg} + 0.390987 \cdot \text{CIC}$$

where the values of the variables in the equation are standardized by subtracting their means and dividing by their standard deviations.

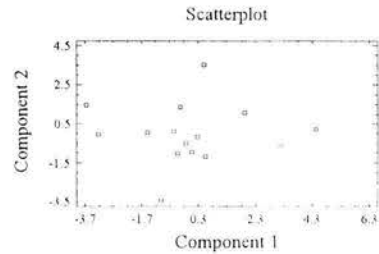
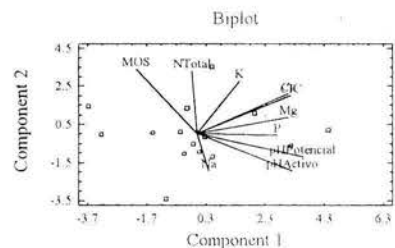
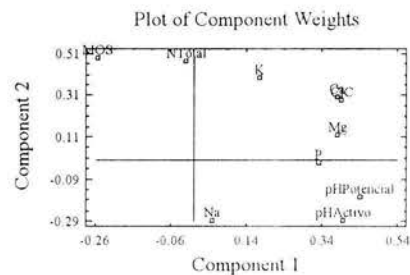


Table of Principal Components

Row	Label	Component 1	Component 2	Component 3
1	D 3	-1.04365	-3.40424	1.1967
2	O 18	3.15084	0.625863	-0.271126
3	O 11	0.0745245	0.919428	2.43266
4	Las Animas	-0.5572	0.190943	0.070591
5	T 16	-0.416991	1.014	1.41411
6	DC 4	1.3182	1.0381	0.198782
7	O 1	4.43539	3.198842	1.0301
8	O 2	0.540314	-1.18986	-1.47248
9	Cruse el 8	0.484581	1.42158	-0.259204
10	O 15	-0.835009	1.38018	0.67557
11	O1 3	-0.122258	0.468474	0.05667
12	H 14	0.267773	-0.192668	0.076240
13	Coronilla	-3.67118	1.4799	1.07336
14	F 2	-1.48519	0.0485047	-0.530381
15	F 11	-3.25702	-0.0121476	-0.200192

The StatAdvisor

This table shows the values of the principal components for each row of your data file. Select Component Weights from the list of Tabular Options to obtain the equations for each component. Select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options to plot this data. You may save the components by pressing the fourth button from the left on the analysis toolbar.



Análisis Cluster

Analysis Summary

Data variables:  
 pHActivo  
 pHPotencial  
 MOS  
 NTotal  
 P  
 Na  
 K  
 Ca  
 Mg  
 CIC

Number of complete cases: 15  
 Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)  
 Distance Metric: Squared Euclidean

Cluster	Members	Percent
1	15	100.00

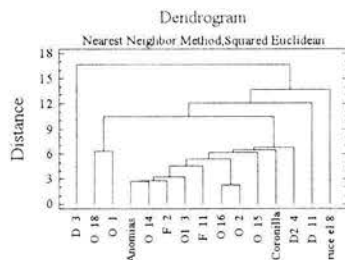
Centroids

Cluster	pHAct	pHPoten	MOS	NTotal	P	Na	K	Ca
1	6.205	5.072	10.66	0.2050	99.8	1.76	0.43	44.51

Cluster	Mg	CIC
1	1.75857	48.4714

The StatAdvisor

This procedure has created 1 cluster from the 15 observations supplied. The clusters are groups of observations with similar characteristics. To form the clusters, the procedure began with each observation in a separate group. It then combined the two observations which were closest together to form a new group. After recomputing the distance between the groups, the two groups then closest together were combined. This process was repeated until only 1 group remained. To specify the number of final clusters, press the alternate mouse button and select Analysis Options. To determine a reasonable value for the number of clusters, look at the Agglomeration Distance Plot available from the list of Graphical Options.



Membership Table

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)  
 Distance Metric: Squared Euclidean

Row	Label	Cluster
1	D 3	1
2	O 18	1
3	D 11	1
4	Las Anemias	1
5	O 16	1
6	D2 4	1
7	O 1	1
8	O 2	1
9	Cruce el 8	1
10	O 15	1
11	O1 3	1
12	O 14	1
13	Coronilla	1
14	F 2	1
15	F 11	1

The StatAdvisor

This table shows which cluster each observation belongs to. To plot these results, select 3D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options.

Agglomeration Schedule

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)  
 Distance Metric: Squared Euclidean

Stage	Clusters Combined		Coefficient	Stage First Appears		Next Stage
	Cluster 1	Cluster 2		Cluster 1	Cluster 2	
1	5	8	2.24641	0	0	6
2	4	12	2.65108	0	0	3
3	4	14	2.82390	2	0	4
4	4	11	3.18418	3	0	5
5	4	13	4.48382	4	0	10
6	4	2	4.33249	4	1	9
7	4	10	6.12225	5	0	14
8	2	7	6.40749	0	0	11
9	4	13	6.41061	7	0	10
10	4	6	6.75869	8	0	15
11	2	4	10.7	8	10	12
12	2	3	12.0448	11	0	13
13	2	8	13.734	12	0	14
14	1	2	16.7691	0	15	0

Cluster Number	Smallest Row
1	1

The StatAdvisor

The agglomeration schedule shows which observations were combined at each stage of the clustering process. For example, in the first stage, observation 5 was combined with observation 8. The distance between the groups when combined was 2.24641. It also shows that the next stage at which this combined group was further combined with another cluster was stage 6.



APÉNDICE 4c, AEMV DE PROPIEDADES BIOLÓGICAS

Análisis de Componentes Principales

Analysis Summary

Data variables:

- Actino
- Alga
- Bacteria
- Hongo

Data input: observations

Number of complete cases: 15

Missing value treatment: listwise

Standardized: yes

Number of components extracted: 2

Principal Components Analysis

Component Number	Eigenvalue	Percent of Variance	Cumulative Percentage
1	2,04478	51,120	51,120
2	0,875348	21,884	73,003
3	0,67019	16,755	89,758
4	0,409679	10,242	100,000

The StatAdvisor

This procedure performs a principal components analysis. The purpose of the analysis is to obtain a small number of linear combinations of the 4 variables which account for most of the variability in the data. In this case, 2 components have been extracted, since 2 components had eigenvalues greater than or equal to 0,8. Together they account for 73,0033% of the variability in the original data.

Scree Plot

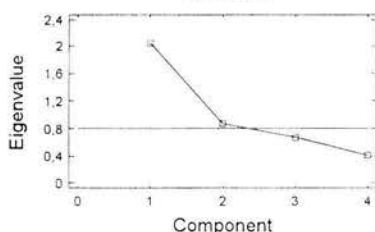


Table of Component Weights

	Component 1	Component 2
Actino	0,490251	-0,135495
Alga	0,46085	-0,645791
Bacteria	0,441109	0,749272
Hongo	0,593881	0,0564564

The StatAdvisor

This table shows the equations of the principal components. For example, the first principal component has the equation

$$0,490251 \cdot BActino + 0,46085 \cdot BAlga + 0,441109 \cdot BBacteria + 0,593881 \cdot BHongo$$

where the values of the variables in the equation are standardized by subtracting their means and dividing by their standard deviations.

Scatterplot

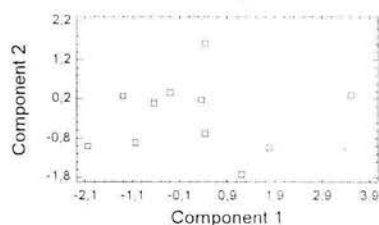


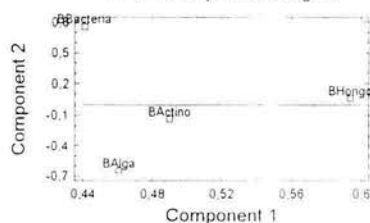
Table of Principal Components

Row	Label	Component 1	Component 2
1	D 3	-0,297797	0,36354
2	D 18	0,44529	1,62175
3	D 11	-1,04089	0,898674
4	las Armas	-0,297797	0,36354
5	D 16	1,19553	1,29906
6	D 14	0,44529	1,62175
7	D 1	3,52117	0,306762
8	D 2	-2,04153	-0,34378
9	Grasa-el @	-1,29824	0,268435
10	D 15	1,77964	1,05056
11	D 3	0,367531	0,179641
12	D 14	-1,29824	0,268435
13	Caronilla	0,448866	-0,68276
14	F 2	-1,29824	0,268435
15	F 11	-0,632853	0,0845354

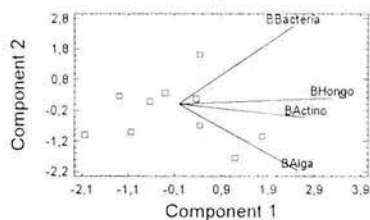
The StatAdvisor

This table shows the values of the principal components for each row of your data file. Select Component Weights from the list of Tabular Options to obtain the equations for each component. Select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options to plot this data. You may save the components by pressing the fourth button from the left on the analysis toolbar.

Plot of Component Weights



Biplot



**Análisis Cluster**

Analysis Summary

Data Variables:

- Actino
- Alga
- Bacteria
- Hongo

Number of complete cases: 15  
 Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)  
 Distance Metric: Squared Euclidean

Cluster	Members	Percent
1	15	100,00

Centroids

Cluster	Actino	Alga	Bacteria	Hongo
1	1,4	0,3333333	2,06667	1,73333

The StatAdvisor

This procedure has created 1 cluster from the 15 observations supplied. The clusters are groups of observations with similar characteristics. To form the clusters, the procedure began with each observation in a separate group. It then combined the two observations which were closest together to form a new group. After recomputing the distance between the groups, the two groups then closest together were combined. This process was repeated until only 1 group remained. To specify the number of final clusters, press the alternate mouse button and select Analysis Options. To determine a reasonable value for the number of clusters, look at the Agglomeration Distance Plot available from the list of Graphical Options.

The StatAdvisor

This table shows which cluster each observation belongs to. To plot these results, select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options.

Agglomeration Schedule

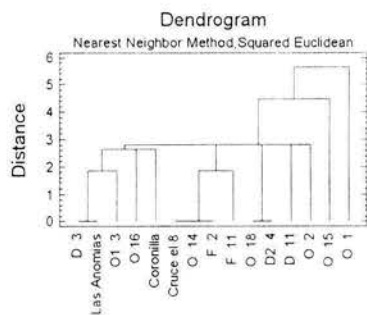
Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)  
 Distance Metric: Squared Euclidean

Stage	Clusters Combined		Distance	Cluster 1	Cluster 2	New Cluster	N
	Cluster 1	Cluster 2					
1	1	4	0,9	0	0	0	0
2	3	6	0,0	0	0	0	11
3	9	12	0,0	0	0	0	4
4	9	14	0,0	5	0	0	5
5	1	11	1,84211	1	0	0	8
6	9	15	1,84211	4	0	0	9
7	5	13	2,625	0	0	0	6
8	1	5	2,625	5	7	5	5
9	1	8	2,83784	8	6	11	11
10	3	8	2,83784	0	0	0	12
11	1	2	2,83784	3	2	12	12
12	1	2	2,83784	11	10	13	13
13	1	10	4,46711	12	0	0	14
14	1	7	5,67588	13	0	0	0

Cluster Number	Smallest Row
1	1

The StatAdvisor

The agglomeration schedule shows which observations were combined at each stage of the clustering process. For example, in the first stage, observation 1 was combined with observation 4. The distance between the groups when combined was 0,9. It also shows that the next stage at which this combined group was further combined with another cluster was stage 5.



Membership Table

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)  
 Distance Metric: Squared Euclidean

Row	Label	Cluster
1	D 3	1
2	O 18	1
3	D 11	1
4	Las Anomias	1
5	O 16	1
6	D 2 4	1
7	O 1	1
8	O 2	1
9	Cruce el 8	1
10	O 15	1
11	O 1	1
12	O 14	1
13	Coccolia	1
14	F 2	1
15	F 11	1

APÉNDICE 4d.AEMV DE PROPIEDADES BIOQUÍMICAS.

Componentes Principales

Analysis Summary

Data variables:  
 CO2  
 CBM  
 Fosf\_alcalina  
 Fosf\_acida

Data input: observations  
 Number of complete cases: 15  
 Missing value treatment: listwise  
 Standardized: yes

Number of components extracted: 2

Principal Components Analysis			
Component Number	Eigenvalue	Percent of Variance	Cumulative Percentage
1	1.69858	42.465	42.465
2	1.47011	36.353	79.217
3	0.58176	14.744	93.761
4	0.24951	6.239	100.000

The StatAdvisor

This procedure performs a principal components analysis. The purpose of the analysis is to obtain a small number of linear combinations of the 4 variables which account for most of the variability in the data. In this case, 2 components have been extracted, since 2 components had eigenvalues greater than or equal to 1.0. Together they account for 79.2172% of the variability in the original data.

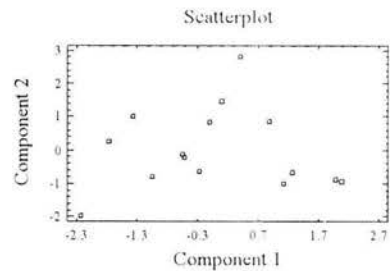


Table of Principal Components

Row	Label	Component 1	Component 2
1	D5	-0.513165	-0.222557
2	D18	1.27506	-0.66419
3	D11	0.707587	2.01027
4	Exp_Amonium	1.75074	0.354087
5	D16	2.08444	0.32667
6	D24	1.10914	-1.01092
7	D1	1.98532	-0.878512
8	D2	2.22748	1.55894
9	Proporcion_H	0.0956618	0.82267
10	D15	0.885745	0.856571
11	D13	0.102106	1.66481
12	D14	-0.270581	-0.644967
13	Coronilla	-1.37296	1.01922
14	D2	-0.548015	0.140706
15	D11	1.0509	0.36934

The StatAdvisor

This table shows the values of the principal components for each row of your data file. Select Component Weights from the list of Tabular Options to obtain the equations for each component. Select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options to plot this data. You may save the components by pressing the fourth button from the left on the analysis toolbar.

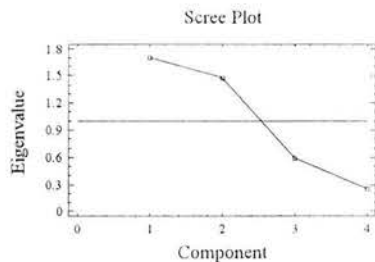


Table of Component Weights

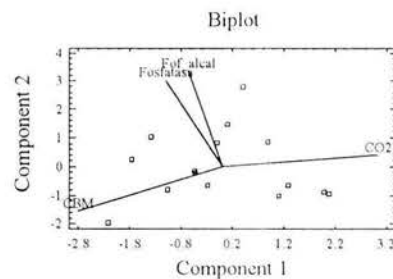
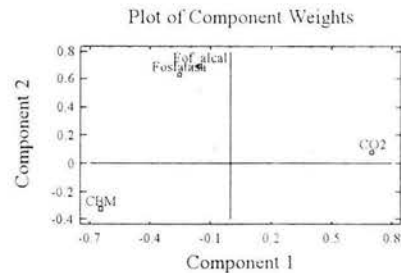
	Component 1	Component 2
CO2	0.701436	0.078799
CBM	-0.647357	-0.32885
Fosf_alc	-0.254574	0.629504
Fosf_ac	-0.15527	0.699439

The StatAdvisor

This table shows the equations of the principal components. For example, the first principal component has the equation

$$0.701436 \cdot CO2 - 0.647357 \cdot CBM - 0.254574 \cdot Fosfatasa - 0.15527 \cdot Fosf_alcal$$

where the values of the variables in the equation are standardized by subtracting their means and dividing by their standard deviations.



**Cluster Analysis**

Analysis Summary

Data variables:  
CO2  
CBM  
Fosfatasa  
Fosf\_alcal

Number of complete cases: 15  
Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)  
Distance Metric: Squared Euclidean

Cluster	Members	Percent
1	15	100.00

Centroids

Cluster	CO2	CBM	Fosf_alc	Fosf_Acida
1	10.5301	157.358	0.0148502	0.0368511

The StatAdvisor

This procedure has created 1 cluster from the 15 observations supplied. The clusters are groups of observations with similar characteristics. To form the clusters, the procedure began with each observation in a separate group. It then combined the two observations which were closest together to form a new group. After recomputing the distance between the groups, the two groups then closest together were combined. This process was repeated until only 1 group remained. To specify the number of final clusters, press the alternate mouse button and select Analysis Options. To determine a reasonable value for the number of clusters, look at the Agglomeration Distance Plot available from the list of Graphical Options.

Agglomeration Schedule

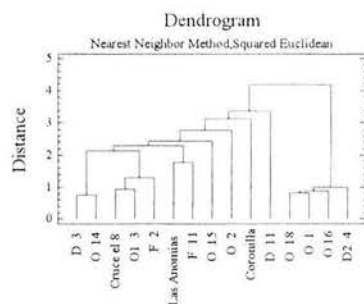
Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)  
Distance Metric: Squared Euclidean

Stage	Clusters Combined		Coefficient	Stage First Appears		Row
	Cluster 1	Cluster 2		Cluster 1	Cluster 2	
1	1	12	0.758005	0	0	8
2	2	7	0.81149	0	0	3
3	2	5	0.880274	2	0	8
4	2	11	0.93342	0	0	9
5	2	8	0.96550	3	0	14
6	9	14	1.28276	4	0	8
7	4	15	1.77011	0	0	9
8	1	9	2.15412	1	0	5
9	1	4	2.30567	8	9	10
10	1	10	2.45137	9	0	11
11	1	8	2.77923	10	0	1
12	1	13	3.13607	11	0	13
13	1	3	3.38447	12	0	14
14	1	2	4.16718	13	5	0

Cluster Number	Smallest Row
1	1

The StatAdvisor

The agglomeration schedule shows which observations were combined at each stage of the clustering process. For example, in the first stage, observation 1 was combined with observation 12. The distance between the groups when combined was 0.758005. It also shows that the next stage at which this combined group was further combined with another cluster was stage 8.



Membership Table

Clustering Method: Nearest Neighbor (Single Linkage)  
Distance Metric: Squared Euclidean

Row	Label	Cluster
1	D 3	1
2	O 18	1
3	D 11	1
4	Las Anonias	1
5	O 16	1
6	D2 4	1
7	O 1	1
8	O 2	1
9	Cruce el 8	1
10	O 15	1
11	O 13	1
12	O 14	1
13	Coronilla	1
14	F 2	1
15	F 11	1

The StatAdvisor

This table shows which cluster each observation belongs to. To plot these results, select 2D Scatterplot or 3D Scatterplot from the list of Graphical Options.