

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS COLEGIO DE GEOGRAFÍA

MODIFICACIONES EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO EN DOS ÁREAS CON INCENDIOS FORESTALES RECIENTES: LA MALINCHE Y EL PELADO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA
PRESENTA
CARLOS ALEJANDRO PÉREZ GARCÍA



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

DIRECTOR DE TESIS: DR. JORGE LÓPEZ BLANCO

MÉXICO, D. F. 2005



m. 344599



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.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1.

Pág.

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.	1
1.2 Hipótesis y objetivos.	3
1.3 Justificación.	5
1.4 Áreas de estudio.	6
1.4.1 Área 1. La Malinche.	7
1.4.2 Clima.	9
1.4.3 Geología.	9
1.4.4 Hidrología.	12
1.4.5 Suelos.	14
1.4.6 Vegetación.	14
1.4.7 Área 2. El Pelado.	16
1.4.8 Clima.	18
1.4.9 Geología.	18
1.4.10 Hidrología.	19
1.4.11 Suelos.	21
1.4.12 Vegetación.	23
1.5 Marco Conceptual.	25
1.5.1 Bosque.	25
1.5.2 Fuego.	28
1.5.3 Incendios forestales como un fenómeno o peligro natural y antrópico.	34
1.5.4 Propiedades de los suelos.	35
1.5.5 Propiedades físicas.	35
1.5.6 Propiedades químicas.	39
1.5.7 Efectos del fuego sobre las propiedades físicas y químicas del suelo.	44

CAPÍTULO 2.

METODOLOGÍA

2.1 Trabajo de gabinete (primera etapa).	47
2.2 Trabajo en Campo, (segunda etapa).	47
2.2.1 Recorrido de las áreas de estudio.	47
2.2.2 Muestreo de suelos.	48
2.2.3 Recolección de muestras para los análisis químicos.	50
2.2.4 Recolección de muestras para análisis físicos.	52
2.3 Trabajo de laboratorio (tercera etapa).	52
2.3.1 Técnicas de análisis para las propiedades físicas y químicas.	53
2.4 Análisis estadísticos (cuarta etapa).	54
2.4.1 Análisis de varianza (<i>ANDEVA</i>).	54
2.4.2 Análisis multivariado de agrupamiento (<i>Cluster</i>).	54

CAPÍTULO 3.	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
3.1 Características físicas y químicas de los suelos en La Malinche.	57
3.2 Análisis multivariado de agrupamiento (<i>Cluster</i>), en La Malinche.	65
3.3 Características físicas y químicas de los suelos en El Pelado.	70
3.4 Análisis multivariado de agrupamiento (<i>Cluster</i>), en El Pelado.	75
3.5 Discusión general.	79
CAPÍTULO 4.	
CONCLUSIONES	83
LITERATURA CITADA	85
ANEXOS	
I Técnicas de laboratorio	97
II Estadísticas de las áreas de estudio	112
INDICE DE TABLAS	
Tabla 1.1 Cantidad de incendios registrados para el Parque Nacional La Malinche	7
Tabla 1.2 Datos de los incendios forestales registrados en la Delegación Tlalpan.	9
Tabla 1.3 Valores medios de densidad aparente.	36
Tabla 1.4 Principales nutrimentos minerales del suelo.	39
Tabla 1.5 Guía para la interpretación de los resultados de materia orgánica y carbón orgánico en el suelo.	41
Tabla 2.1 Número de muestras del suelo para los análisis químicos por profundidad y disposición en el terreno.	51
Tabla 2.2 Número de muestras para los análisis físicos por disposición en el terreno.	53
Tabla 3.1. Datos de estabilidad de agregados en La Malinche.	60
Tabla 3.2. Resultados de las variables químicas en el área de La Malinche.	62
Tabla 3.3. Datos de estabilidad de agregados en El Pelado.	72
Tabla 3.4. Resultados de las variables químicas en el área de El Pelado.	74
INDICE DE FIGURAS	
Figura 1.1 Área quemada durante la época de secas del 2003 en El Pelado.	8
Figura 1.2 Localización de las áreas de estudio.	10
Figura 1.3 Mapa geológico de La Malinche.	13
Figura 1.4 Mapa edafológico de La Malinche.	15
Figura 1.5 Mapa de uso de suelo y vegetación de La Malinche.	17
Figura 1.6 Mapa geológico del área de El Pelado.	20
Figura 1.7 Mapa Edafológico del área de El Pelado.	22
Figura 1.8 Mapa Uso de suelo y Vegetación del área de El Pelado.	24
Figura 1.9 Porciones de una ladera en forma generalizada.	27
Figura 1.10 Elementos necesarios para la generación del fuego.	28
Figura 1.11 Tipos de incendios forestales.	30

Figura 1.12 Efecto de las cañadas con el movimiento del aire.	33
Figura 1.13 Efecto del proceso de combustión sobre los elementos nutritivos del suelo.	44
Figura 2.1 Recorrido de las áreas afectadas por los incendios forestales de tipo superficial en la región de El Pelado, Tlalpan.	48
Figura 2.2 Orientación de los sitios de muestreo de acuerdo a su disposición en el terreno, en el área de La Malinche.	49
Figura 2.3 Transectos de los sitios de muestreo (no-quemados y quemados).	50
Figura 2.4 Recolección (A) y profundidad (B) del muestreo en las áreas quemadas.	51
Figura 2.5 Toma de muestras para los análisis físicos de agregados (A) y densidad aparente (B).	52
Figura 2.6 Trabajo de laboratorio para la determinación de textura por el hidrómetro de Bouyoucos.	54
Figura 3.1 Gráfica de las variables densidad aparente y densidad real con sus dos tratamientos, quemado (Q) y no-quemado (NOQ).	58
Figura 3.2 Gráfica de las variables porosidad y humedad con sus dos tratamientos, quemado (Q) y no-quemado (NOQ), expresadas en porcentajes.	59
Figura 3.3 Valores de concentración de fósforo disponible en suelos quemados (Q) y no-quemados (NOQ), para una sola profundidad, en la Malinche.	64
Figura 3.4 Dendrograma. Parque Nacional La Malinche, suelo no-quemado.	66
Figura 3.5 Dendrograma. Parque Nacional La Malinche, suelo quemado.	67
Figura 3.6 Gráfica de las variables densidad aparente y densidad real con sus dos tratamientos, quemado (Q) y no-quemado (NOQ).	69
Figura 3.7 Gráfica de las variables porosidad y humedad con sus dos tratamientos, quemado (Q) y no-quemado (NOQ), expresadas en porcentajes.	70
Figura 3.8 Valores de concentración de fósforo disponible en suelos quemados (Q) y no-quemados (NOQ), para una sola profundidad (0-3 cm), en El Pelado.	75
Figura 3.9 Dendrograma. El Pelado, suelo no-quemado.	76
Figura 3.10 Dendrograma. El Pelado, suelo quemado.	78

Este trabajo esta dedicado con todo mi amor a Mi Madre

Leticia García Godínez

Por su apoyo, comprensión y esfuerzo realizado
a lo largo de tantos años, sacando a nuestra familia adelante

A mi abuela Vicenta Godínez (†)

A mis hermanas Janet y Brenda

A mis sobrinas Karina, Mayra, Renata y Valentina

Y a toda la familia García Godínez en especial a mis tíos Alberto y Patricia.

Y

A Cibeli Enríquez por ser un gran pilar y una ejemplar compañera
a lo largo de estos años.

GRACIAS

*"Un libro hermoso es una victoria ganada
en todos los campos de batalla del pensamiento humano."*

Honoré de Balzac

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por ser parte de su alumnado, donde aprendí el verdadero valor de la vida que es el conocimiento adquirido a través de los libros y porque cada día me sentí orgulloso de ser un PUMA y por permitirme conocer a los amigos que hoy y siempre estarán conmigo.

Al Instituto de Geografía por abrirme las puertas durante mi formación académica al poder compartir sus instalaciones e infraestructura.

Al Proyecto CONACYT "Comportamiento del fuego y evaluación de riesgos a incendios en áreas forestales de México: Un estudio en el volcán La Malinche". Clave: 38697-V.

A mi asesor Dr. Jorge López Blanco por sus enseñanzas a lo largo de mi formación académica, por haber creído en mí y por su calidad humana.

Al M.C. Gilberto Vela Correa por su amistad, paciencia y por permitirme formar parte de su equipo de trabajo donde aprendí un poco del fascinante mundo de los suelos.

A la Dra. Pilar Ortega Larrocea por sus acertados comentarios y su tiempo en la revisión de esta tesis y por su ayuda en el trabajo de laboratorio.

A los sinodales Dra. Lourdes Villers Ruiz y Dr. Lorenzo Vázquez Selem por la revisión y observaciones de este trabajo.



"Un buen maestro sólo puedo enseñarte los caminos al éxito. Eres tu quien debe explorarlos."

Omar Henríquez

Agradezco infinitamente a mis amigos por acompañarme en las buenas y en las malas a lo largo de la carrera y durante nuestra estancia en la UNAM. Rafael Aragón González, Sergio Salinas, Giovanni Vidal, Osvaldo Franco, Pablo Flores Lorenzo (Mi Carnal), Miguel Castillo, Milagros Campos (La mili-metro) y Raúl Gutiérrez.

También quiero agradecer a mis compañeros que durante la carrera me acompañaron Jonatan Omar, Salvador Colín, José Antonio Quiroz, Ismael Pineda, Mario Enciso, Omar Esteban (Goku), Miguel Ángel Condado, Pedro Silva, Fernando Velasco, Mariana López Ochoa, Asunción, Patricia Vega, y Gloria Carolina.

A mis compañeros del Instituto de Geografía Lourdes Rodríguez, Pedro Montes, Christina Colín, Raymundo de Colín, Miguel Santos, Liz Huitzil, Alberto López,

"Produce una inmensa tristeza pensar que la naturaleza habla mientras el género humano no escucha."

Victor Hugo

Capítulo 1

Introducción

La mayoría de los bosques en la actualidad, han sido modificados directa o indirectamente por fenómenos naturales y con mayor importancia por procesos antrópicos, ambos considerados como perjudiciosos y desastrosos, de acuerdo al daño ocasionado. Ahora bien, en un bosque, los fenómenos como los incendios, la explotación forestal, el desmonte de la tierra, el desarrollo urbano, los huracanes, las plagas de insectos, las enfermedades epidémicas afectan la vida, el crecimiento de los árboles y el desarrollo del suelo influyendo en la situación forestal actual (Spurr y Barnes, 1980).

Los incendios forestales son considerados uno de los mayores impactos ecológicos de la vida silvestre que han afectado los bosques de nuestro planeta en una u otra época, debido a este tipo de fenómenos en los ecosistemas forestales se tienen registros de que cerca de 13'000,000 ha han sido afectadas, siendo en la mayoría de los casos en países tropicales y en vías de desarrollo (Andrev *et al.* 2001).

Sin embargo, en México el fuego ha formado parte de la rica mitología prehispánica. Sobre todo en el campo de la agricultura y la ganadería. Por ejemplo, el sistema de roza-tumba-quema se remonta a los pueblos nativos de América, como los olmecas y los mayas. Ellos se percataron de que las parcelas con roza y siembra no otorgaban los beneficios de las cenizas que enriquecían al suelo con propiedades nutrimentales y que en muchos casos eliminaban plagas y maleza (True, 2001). Es por ello que este sistema ha prevalecido hasta nuestros días como la forma más práctica para sembrar. Pero, este tipo de prácticas en la mayor parte de los casos no son preparadas para evitar que el fuego adquiriera el carácter de destructivo e incontrolable. Ejemplo de ello, Trápaga (2002), explica que en los años 80's este tipo de fenómenos ocupó el tercer lugar como causa de deforestación, y enfatiza su estudio en los grandes incendios de los años 1997-1998 (este último conocido como el año más caliente del planeta).

En la actualidad la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la responsable del control de los incendios forestales en México desde diciembre de 1994.

Al decretarse la reforma a la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, en su artículo 32 bis, menciona que es responsabilidad de esta institución, fomentar la protección, restauración y conservación de los ecosistemas y recursos naturales. En el Plan Nacional de Desarrollo 1995-2000, se establece que “nuestra atención debe centrarse en frenar las tendencias del deterioro ecológico y sentar las bases para transitar a un desarrollo sustentable”. Aunque, no es lo suficiente basta para controlar el total de los incendios forestales del país, la SEMARNAT se coordina con otras Secretarías de Estado, como: Secretaría de la Defensa nacional (SEDENA), Gobiernos Estatales y Municipales (Cedeño, 1999).

Las propiedades físicas, químicas y biológicas son las características más importantes que necesita un suelo para su desarrollo, dentro de ellas las fuerzas físicas son las causantes de modificar la posición forma y tamaño en las rocas y de otros materiales sin alterar su composición; en tanto que las químicas producen nuevas sustancias cuya composición puede ser muy diferente a la del material de origen (Teuscher y Adler, 1982).

Los incendios sufridos en las áreas de estudio de El Parque Nacional La Malinche y El Volcán Pelado, fueron de tipo superficial y con intensidad de moderada a alta, mismos que ocasionaron que se diferenciaron las propiedades físicas y químicas de los suelos (como se demostrará más adelante en este trabajo). En las propiedades físicas, los valores la porosidad, densidad real y humedad fueron menores en los sitios quemados, mientras que los valores de la densidad aparente y los agregados fueron mayores con respecto a los sitios no-quemados. Las propiedades químicas de los suelos quemados presentaron mayores valores de materia orgánica y de nutrimentos.

La presente tesis consta de cuatro capítulos y dos anexos, mismos que describen las etapas correspondientes que conformaron el estudio. En primer lugar se plantearon los objetivos, hipótesis, justificación y el marco de referencia. Posteriormente se describieron las áreas de estudio, y la metodología empleada para el trabajo en campo y en el laboratorio. Por último, se presenta la interpretación y la discusión de los resultados, mismos que generaron las conclusiones aportadas.

1.1 Antecedentes

En esta parte se muestran algunas referencias bibliográficas que consideran el impacto de los incendios forestales en las propiedades físicas y químicas de los suelos. Las más importantes son las siguientes:

Sreenivasan y Aurangebhadkar (1940, citados en Lal, 1987) describen cambios después de un incendio forestal en las propiedades físicas de un Vertisol, en Indore, India. Datos que marcaron un decrecimiento en el contenido de arcillas y un incremento de limos y arenas finas, como un resultado de la calcinación del suelo, llamándolo “suelo de textura ligera”.

Jalaluddin (1969) menciona que la incorporación al suelo de la ceniza, producto de la quema, aumenta el pH del suelo y puede ser de hasta tres unidades, lo que representa un cambio para las condiciones de solubilidad de las sales minerales y las condiciones de vida de las raíces y los microorganismos. Viro (1974), por su parte aporta datos de un incendio forestal en los que registra aumentos del 300% en calcio, 200% en magnesio y cambios en la estructura de la materia orgánica del suelo. Mientras que Bruce y Lal (1975, citados en Lal, 1987), observaron diferencias en la estructura del suelo en función que a una temperatura de 105°C decreció la estabilidad estructural de un Vertisol, pero ésta se incremento en un Alfisol.

Aguirre y Rey (1980), mencionaron que el fuego quema la cobertura vegetal y el lecho orgánico del suelo es destruido, alterando las propiedades físicas ocasionando con esto variaciones al ciclo hidrológico, lo cual intensifica la escorrentía, pudiendo propiciar erosión, crecidas, inundaciones, etc.

Pritchett (1986), informó que los agregados del suelo después del fuego se dispersan debido al impacto de la lluvia, donde las partículas quemadas obstruyen los macroporos disminuyendo la infiltración y la aireación del suelo.

Flores y Benavides (1995) experimentaron una quema prescrita, en la cual aplicaron fuego a bajas intensidades en la Sierra de Tapalpa, Jalisco y demostraron que estas quemas no tuvieron cambios significativos en las propiedades físico-químicas de un suelo forestal.

Al existir cambios en las propiedades físicas del suelo Inbar *et al.* (1998), determinaron que existen procesos geomorfológicos, tales como la erosión, el escurrimiento y la producción de sedimentos que se aceleran y causan un efecto en la dinámica superficial del relieve debido a los incendios forestales.

Marafa y Chau (1999), seleccionaron dos sitios para su estudio, el Parque Nacional Tai Mo Shan y el Parque Nacional Shing Mun en Hong Kong. Dichos sitios fueron denominados como la quema actual y la quema antigua, respectivamente. Ellos realizaron una comparación entre las propiedades químicas de los suelos de estas áreas. Una con tres incendios ocurridos cada tres años (1988, 1991 y 1994), y la otra con un único incendio en 1988, respectivamente. Analizan las propiedades a dos profundidades de 0-5 y 5-10 cm en el suelo. Concluyen que el fuego causa un incremento en el intercambio de K^+ pero no de Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++} , debido a la incompleta combustión de la materia orgánica.

Ternan y Neller (1999), investigaron la erodabilidad de los suelos en áreas con alta frecuencia de incendios en Hong Kong, donde reconocen disminución en la estabilidad de los agregados y la porosidad, relacionándolo con la influencia del drenaje del suelo y especifican que existe una dependencia de la CIC con respecto a la estabilidad de los agregados, la textura y el carbón orgánico.

Por su parte, Giovannini *et al.* (2001) en su estudio, realizaron una quema prescrita a diferentes temperaturas, observando que el porcentaje de arcillas disminuyó hasta en un 55% de su composición natural, como efecto del incendio. Además, los autores demostraron la pérdida de biomasa a diferentes temperaturas y tiempo de residencia del fuego.

Recientemente, Andreu *et al.* (2001), estudiaron el efecto del fuego con respecto a la evolución de la estructura del suelo después de un incendio forestal en dos áreas de un bosque de pino mediterráneo; las dos áreas fueron en laderas de orientación opuesta pero con características topográficas y edafológicas similares. Asimismo, monitorearon durante las cuatro estaciones del año la erosión hídrica mediante áreas piloto como referencia. En sus resultados muestran un incremento de agregación en los suelos de la ladera orientada al norte con respecto a los suelos de la ladera orientada al sur y expresan que ambas áreas tienen una alta pérdida de suelo durante los primeros cuatro meses después del incendio.

Cannon *et al.* (2001), relacionaron el inicio de un flujo de detritos en las montañas Storm King de Colorado con un incendio forestal. Ahí una tormenta acarrió grandes flujos laminares a altas velocidades ocasionando el movimiento de leños, vegetación quemada, ceniza, rocas, lodo, etc. dentro de una cuenca con topografía abrupta. Esto provocó grandes depósitos de sedimentos teniendo que evacuar el poblado de Glenwood Spring, debido al peligro que representaban estos flujos.

Dragovich y Morris (2002), trabajaron con incendios a altas temperaturas, concluyeron que el suelo se vuelve hidrofóbico, debido a compactación, donde el impacto de las gotas de lluvia provocan la separación de las partículas del suelo y el salpicamiento de estas gotas contribuye ladera abajo al movimiento de sedimentos y al aumento de la escorrentía.

1.2 Hipótesis y objetivos

-Las propiedades físico-químicas de un suelo forestal serán afectadas diferencialmente dependiendo de su posición en el relieve (cauce, dorso de ladera y superficie cumbral).

-Las propiedades químicas de un suelo forestal pueden ser afectadas tanto por la posición en el relieve como por la profundidad. Siendo más intensos en la parte superficial del suelo (0-3 cm de profundidad) debido al proceso de combustión.

Objetivo general

Determinar las diferencias en las propiedades físicas y químicas que tuvieron los suelos, en las áreas de La Malinche y El Pelado, debido a un incendio forestal reciente (2003), considerando la influencia de tres posiciones en el relieve, la profundidad del suelo y su condición de no-quemado y quemado.

Objetivos particulares

- Determinar las propiedades físicas de una misma unidad de suelo referida a dos condiciones, quemado y no quemado, bajo tres distintos tipos de relieve, a la profundidad de 0 a 3 cm.
- Determinar las propiedades químicas de una misma serie de suelo referida a dos condiciones, quemado y no quemado, bajo tres tipos distintos de relieve y dos profundidades.
- Analizar los datos obtenidos en el laboratorio, mediante estadística descriptiva, análisis de la varianza (*ANDEVA*) y el análisis multivariado de agrupamiento (*cluster*).

1.3 Justificación

En las últimas décadas los recursos naturales han sido perturbados drásticamente por fenómenos como los incendios forestales, según Torres (1998) son la segunda causa en la pérdida de superficie forestal en México. La evaluación del suelo dentro de un incendio forestal ayudará a conocer problemas ambientales como pérdida de nutrimentos, de materia orgánica y del suelo por erosión, cambios de pH, reducción en la cantidad de agua, infiltración e incremento de la lluvia y endurecimiento de la capa superficial, entre otras (Vela *et al.*, 2004).

La importancia del presente trabajo es conocer el comportamiento dinámico de las áreas quemadas para evaluar las propiedades físicas y químicas del suelo. Tomando como enfoque a la geomorfología, disciplina encargada de estudiar el origen, la evolución, la dinámica, la configuración del relieve y los procesos que modifican la superficie terrestre.

1.4 Áreas de estudio

En los últimos años se han registrado durante la época de secas incendios forestales de diferentes tipos e intensidades en varias áreas del país. Entre las más recurrentes El Parque Nacional La Malinche, en los estados de Tlaxcala y Puebla y el Volcán El Pelado, en la Delegación Tlalpan del Distrito Federal, mismos que forman parte de la actual investigación en los incendios forestales que se presentaron en el mes de marzo de 2003.

Villers *et al.* (2002), en su investigación de recurrencia de incendios en el Parque Nacional La Malinche, evaluaron el período 1990-2000 (Tabla 1.1), en donde de un total de 1 069 incendios registrados, el 61% ocurrieron en los meses de marzo y abril, con una superficie afectada de 4 284 ha y tan solo en los meses de enero a mayo del año de 1998 sucedieron el 43% de los incendios de esta década en el parque. De acuerdo, a los brigadistas de campo (comunicación Personal) que pertenecen al estado de Tlaxcala, la mayoría de los incendios en esta área corresponden a incendios provocados desde las partes más bajas del volcán, provienen principalmente del estado de Puebla, donde la población se dedica a la práctica de la agricultura y realizan quemas que provocan el desplazamiento del fuego a las partes altas convirtiéndose en incendios forestales.

Tabla 1.1. Cantidad de incendios registrados para el Parque Nacional La Malinche

MESES								
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Diciembre	Total
1990	4	0	12	10	5	0	0	31
1991	7	4	31	14	3	0	0	59
1995	5	10	32	49	12	4	2	114
1996	9	20	43	60	8	0	0	140
1997	8	25	34	7	4	0	10	88
1998	28	113	148	93	85	0	0	467
1999	0	3	8	38	15	2	0	66
2000	7	13	41	36	7	0	0	104
Total	68	188	349	307	139	6	12	1 069

Fuente: Villers *et al.*, 2002.

En los espacios rurales del Distrito Federal como en el Ajusco y las áreas aledañas, la principal causa de los incendios forestales registrados recaen en la quema de pastizales en un 95%, por actividades agrícolas 3%, fogatas y vandalismo 1% y otros son ocasionados como medida para lograr un cambio de uso de suelo, principalmente para la construcción de viviendas, esto debido al incesante crecimiento de la ciudad (Paré, 1999). Considerando, a los pastizales como una fuente de forraje para el ganado que es dejado en libertad en áreas seleccionadas, durante la época de secas es frecuente que quemen estos pastizales (Figura 1.1), con el propósito de obtener renuevos para el consumo de los animales. De acuerdo al Programa Integral de Prevención y Combate de Incendios Forestales del Distrito Federal (2001-2002), todos los incendios forestales que se registraron en el transcurso de los últimos años fueron provocados por acciones humanas, los datos se muestran en la Tabla 1.2, y en la mayoría de estos casos son debido a negligencia y falta de control en el uso del fuego.



Figura 1.1. Área quemada durante la época de secas del 2003 en El Pelado.

Tabla 1.2. Datos de los incendios forestales registrados en la Delegación Tlalpan.

TEMPORADA	CANTIDAD DE INCENDIOS	SUPERFICIE AFECTADA ha
1990-1991	916	2 767.70
1991-1992	-----	-----
1992-1993	129	213.36
1993-1994	565	943.04
1994-1995	739	1 337.41
1995-1996	806	1 779.45
1996-1997	591	755.30
1997-1998	1,043	2 520.37
1998-1999	198	243.30
1999-2000	342	794.96
2000-2001	290	347.21
2001-2002	224	236.73

Fuente: Programa Integral de Prevención y Combate de Incendios Forestales del Distrito Federal (2001-2002).

1.4.1 Área 1. La Malinche: El volcán Matlacuéyatl “Faldas Azules”, es también conocido como La Malinche, se localiza en la porción central del Cinturón Volcánico Transmexicano (Figura 1.2). De acuerdo con el decreto del 6 de octubre de 1938, el Parque Nacional tiene 45 805 ha, de éstas 33 155 ha corresponden al Estado de Tlaxcala y 12 650 ha al Estado de Puebla. El edificio volcánico tiene una altura de 4 461 msnm y consta de una base muy amplia superior a los 30 kilómetros de diámetro, con pendientes poco pronunciadas hasta sus laderas escarpadas a una altura aproximada de 3 300 msnm (SPP, 1981).

1.4.2 Clima

Allende (1968), basado en el sistema de clasificación climática desarrollada por Enriqueta García, aporta los siguientes resultados del volcán la Malinche y áreas circunvecinas, donde se pueden apreciar cinco tipos climáticos diferentes.

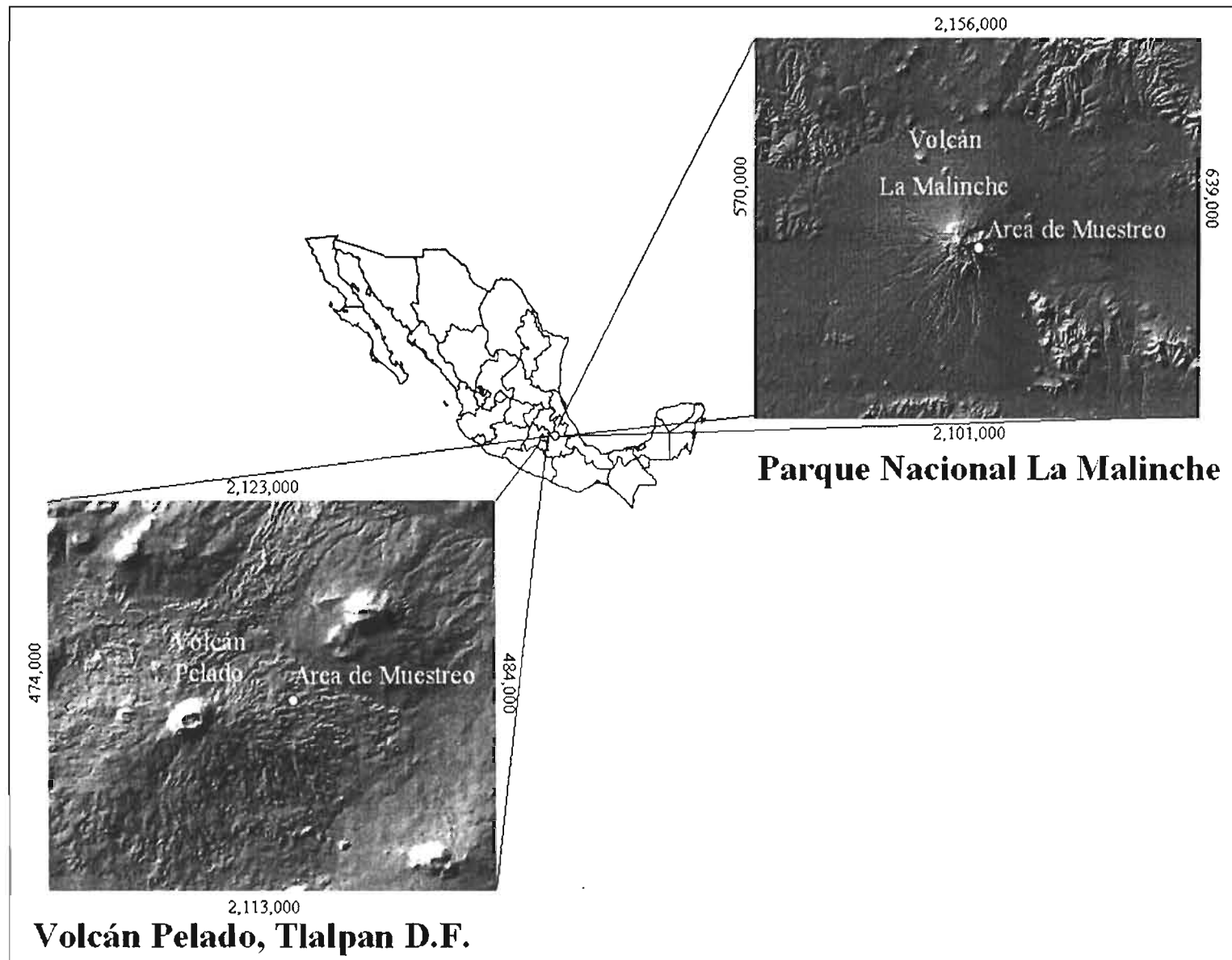


Figura 1.2. Localización de las áreas de estudio.

C (w1) (w) big.- Abarca las ciudades de Puebla en la parte sur hasta los 3 000 msnm y Huamantla en el área norte hasta los 2 750 msnm, es un clima templado, con verano fresco largo, lluvias en el verano, temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura media del mes más caliente entre 6.5 y 22°C, temperatura media del mes más frío entre -3 y 18°C, porcentaje de lluvia invernal menor al 5% de la precipitación media anual, variaciones entre la temperatura media mensual menor a 5°C y el mes más caliente antes del solsticio de verano.

C (w2) (w) big.- Abarca la región de Apizaco y Acajete, es muy similar al anterior variando sólo en que la precipitación media anual es superior en este último, por lo que se le considera el más húmedo de los subhúmedos.

C (w2) (w) (b') ig.- Abarca el área desde los 3 000 hasta los 3 750 msnm en la vertiente sur de La Malinche y desde los 2 750 hasta los 3 500 msnm en la vertiente norte, es un clima semi-frío, con verano fresco y largo, lluvias en el verano, temperatura media anual entre 5 y 12°C, temperatura media del mes más caliente entre 6.5 y 22°C, temperatura media del mes más frío entre -3 y 18°C, y más de cuatro meses con temperatura media superior a los 10°C; el porcentaje de lluvia invernal es inferior al 5% de la precipitación media anual, con variación térmica menor a 5°C en todo el año y el mes más caliente antes del solsticio de verano.

C (w2) (w) cig.- Abarca desde los 3 750 hasta los 4 000 msnm en la vertiente sur y desde los 3 500 hasta los 4 000 msnm en la vertiente norte; es un clima semi-frío, con verano fresco corto, con todas las características del anterior sólo que tiene menos de cuatro meses con temperatura superior a 10°C.

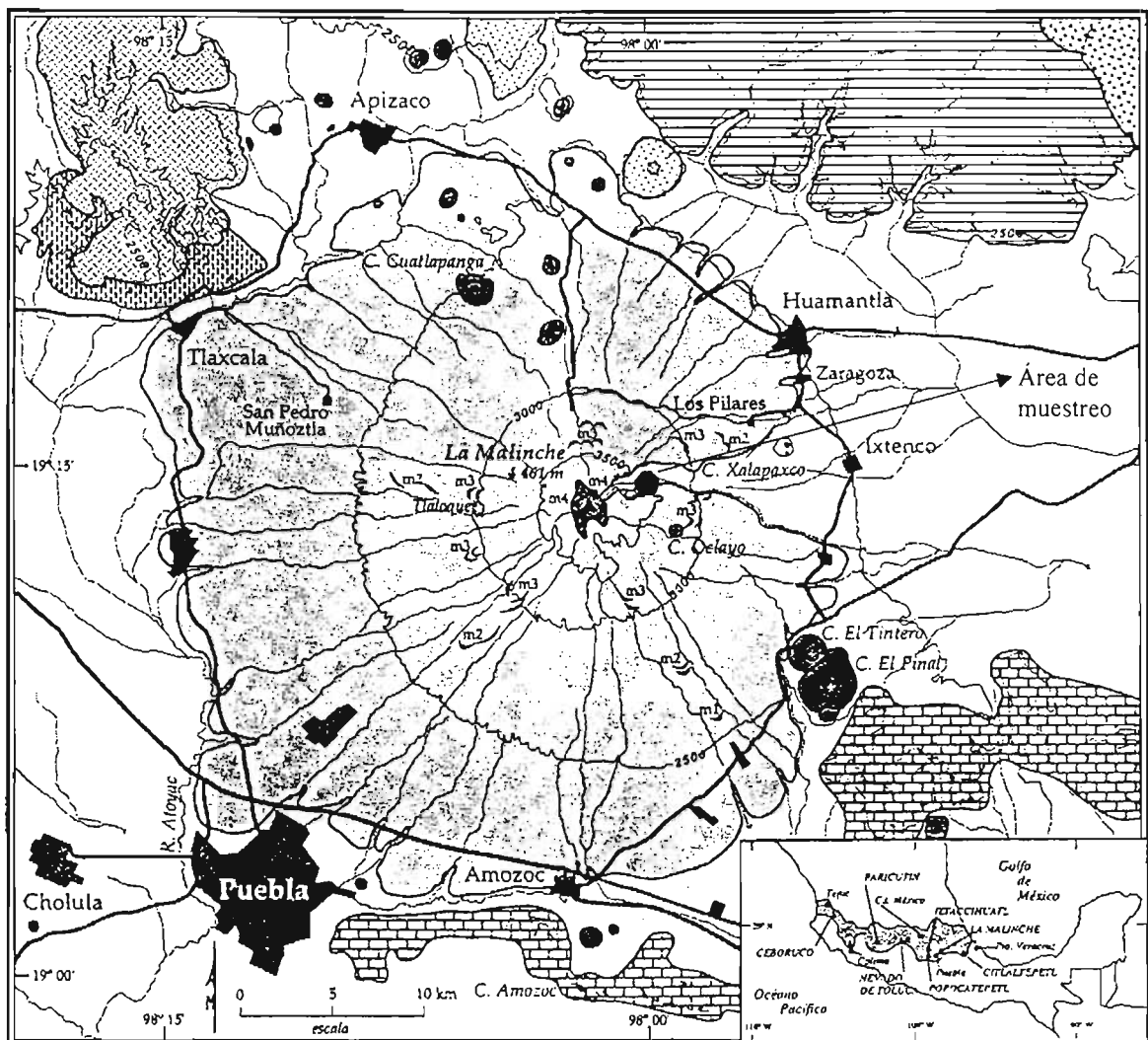
E (T) C.- Abarca ambas vertientes desde los 4 000 msnm en adelante, es un clima frío, con temperatura media anual entre -2 y 5°C, temperatura media del mes más caliente entre 0 y 6.5°C y temperatura media del mes más frío inferior a 0°C.

1.4.3 Geología

El volcán La Malinche, es de tipo poligenético, está emplazado tectónicamente en una área de debilidad continental activa, subduciendo la placa oceánica de Cocos a la placa continental de Norteamérica (Demant, 1978).

Actualmente no presenta actividad fumárolica, no se le conoce actividad histórica y el cráter central está muy erosionado. Castro (1999) presentó estudios en los cuales describe que la edad más joven de un depósito es de 3 100 años A.P. La estratigrafía del volcán está compuesta por depósitos piroclásticos de composición dacítica/andesítica (Figura 1.3). A simple vista no se observan depósitos de flujos de lava, aunque es probable que existan y no afloren por estar cubiertos por los depósitos piroclásticos más recientes (Castro, 1999). La única lava que se puede apreciar es del domo dacítico que conforma la cima.

La cima se encuentra parcialmente destruida, por la erosión glacial, ahí se origina un gran abanico aluvial que se extiende hacia el este, donde se encuentra el cerro Xalapasco. Este cerro es un cono de tobas que contiene cráteres adventicios (Castro, 1999); entre los más grandes, uno se localiza en la ladera occidental llamado Atitlán y los dos restantes en la ladera oriental. El basamento sobre el que se edificó no es bien conocido, existen rocas sedimentarias que afloran cerca del edificio y pueden constituir indicios del basamento. Dentro de la Formación Maltrata, se presentan calizas arcillosas (de edad cretácica) y afloran en el Cerro Amozoc, también afloran conglomerados, areniscas y pelitas calcáreas de la Formación Mezcala al sur del Cerro Amozoc y al este del Cerro El Pinal (Werner, 1978). La existencia de estas rocas debajo de La Malinche, se interpreta por la presencia de xenolitos que incluyen fragmentos de calizas cretácicas. En el valle del Atoyac afloran areniscas, conglomerados, esquistos y calizas de la formación Mezcala. En el noroeste están expuestos sedimentos lacustres constituidos, en su mayoría, por depósitos piroclásticos granulares, limosos y arcillosos, mismos que son considerados de edad terciaria (Castro, 1999).



Leyenda

	Depósitos aluviales (Pleistoceno tardío-Holoceno)
	Depósitos piroclásticos y fluviales (Pleistoceno tardío-Holoceno)
	Depósitos de La Malinche (Pleistoceno tardío-Holoceno)
	Basalto (Cuaternario)
	Depósitos lacustres (Terciario-Cuaternario)
	Andesitas no diferenciadas (Terciario (?))
	Andesita El Crestón (Mioceno tardío)
	Calizas (Cretácico)

Simbología

	Cima
	Cráter
	Domos y conos volcánicos
	Morrenas laterales y terminales
	Poblaciones
	Río
	Contorno topográfico
	Carretera

Figura 1.3. Mapa geológico de La Malinche. Tomado de Castro (1999).

1.4.4 Hidrología

Sobre la superficie del volcán se forman arroyos provenientes del deshielo y la lluvia (Allende, 1968). Hacia la región del estado de Puebla, se forma el río Malinche el cual fluye de este a oeste y se convierte en un afluente del río Atoyac, y el arroyo del Pinal que fluye de norte a sur y que en conjunto con otros ríos de menor caudal, son afluentes del río Águila. Hacia la región del estado de Tlaxcala, se forma un río que corre de este a oeste por la barranca de la Malinche uniéndose con otros de menor caudal en la laguna de Santiago Ovando, a esta misma región llega el río Guadalupe que se forma en la parte oeste del volcán y fluye hacia el noreste. También se forman algunos ríos que fluyen de norte a sur tales como, el Zahuapan, Apizaquito, Apizaco, Atenco y San Juan todos estos afluentes del río Atoyac (Allende, 1968).

1.4.5 Suelos

Con respecto a los suelos de La Malinche, están estrechamente ligados al material parental y al clima, en una clasificación zonal de alturas. De acuerdo con Werner (1978) a continuación se explican los suelos en la clasificación FAO del mapa de la Figura 1.4, en el que se pueden apreciar los predominantes de El Parque Nacional La Malinche.

En las laderas sur y sureste de este Parque Nacional, aparecen corrientes de lodo llamados lahares, estos dan paso a suelos de tipo Ranker, estos son suelos que sus horizontes están poco desarrollados y pueden presentarse de delgados a profundos, mismos que poseen un horizonte A úmbrico con menos de 25 cm de profundidad su material es de sedimentos pedregosos con arenas y gravas glaciofluviales que alcanzan parcialmente espesores de varios metros. El material fino, se compone de una mezcla de arena y tobas que se encuentran endurecidas.

Andosoles. Suelos de depósitos piroclásticos y cenizas volcánicas, por lo general bien desarrollados, de profundidad media a profundos, muy sueltos y de alta permeabilidad, con alto peligro de erosión y predominantemente de uso forestal, estos suelos imperan en las laderas del volcán.

Mapa edafológico de La Malinche

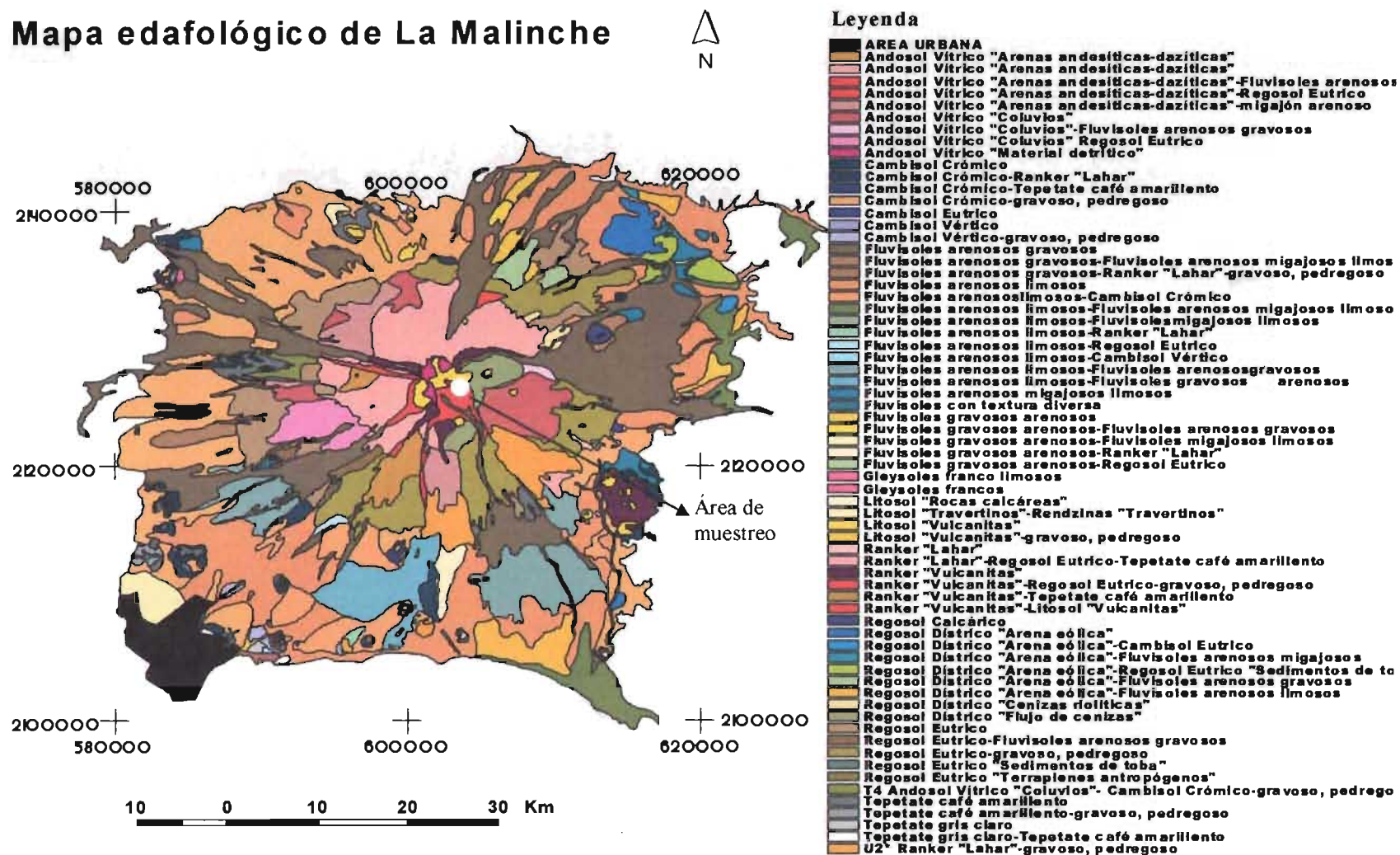


Figura 1.4. Mapa edafológico de La Malinche. Tomado de Werner (1974/76).

Fluvisoles. Suelos de sedimentos aluviales, poco desarrollados y poco profundos, se localizan en las porciones planas de los grandes barrancos.

Regosoles. Sedimentos de toba, de arena fina limosa a limo fino arenoso, aprovechables agrícolamente cuando la inclinación no es demasiado pronunciada, localizados en los piedemontes.

Litsoles. Suelos poco desarrollados extremadamente delgados, la roca se encuentra a menos de 10 cm de profundidad, algunos pueden ser fértiles o infértiles, arenosos o arcillosos, contienen menos del 10% de partículas finas y son susceptibles a erosionarse dependiendo de su localización topográfica.

1.4.6 Vegetación

Los tipos de vegetación del área de estudio están compuestos por pastizal alpino que se presenta a una altura mayor de los 4 000 msnm (Arellano *et al.*, 2001), en un nivel superior del bosque de pinos; bosques de pino y oyamel, a una altitud promedio de 2 500 a 4 000 msnm; otros tipos de bosques mixtos del tipo de encinos, pino-encino, pino-encino-oyamel y pino-encino-aile entre los 2 500 y los 2 700 msnm y hacia las laderas entre los 2 000 y 2 500 msnm predominan las latifoliadas del tipo de encinos y la vegetación inducida de magueyes y frutales (Figura 1.5).

Mapa uso de suelo y vegetación de La Malinche

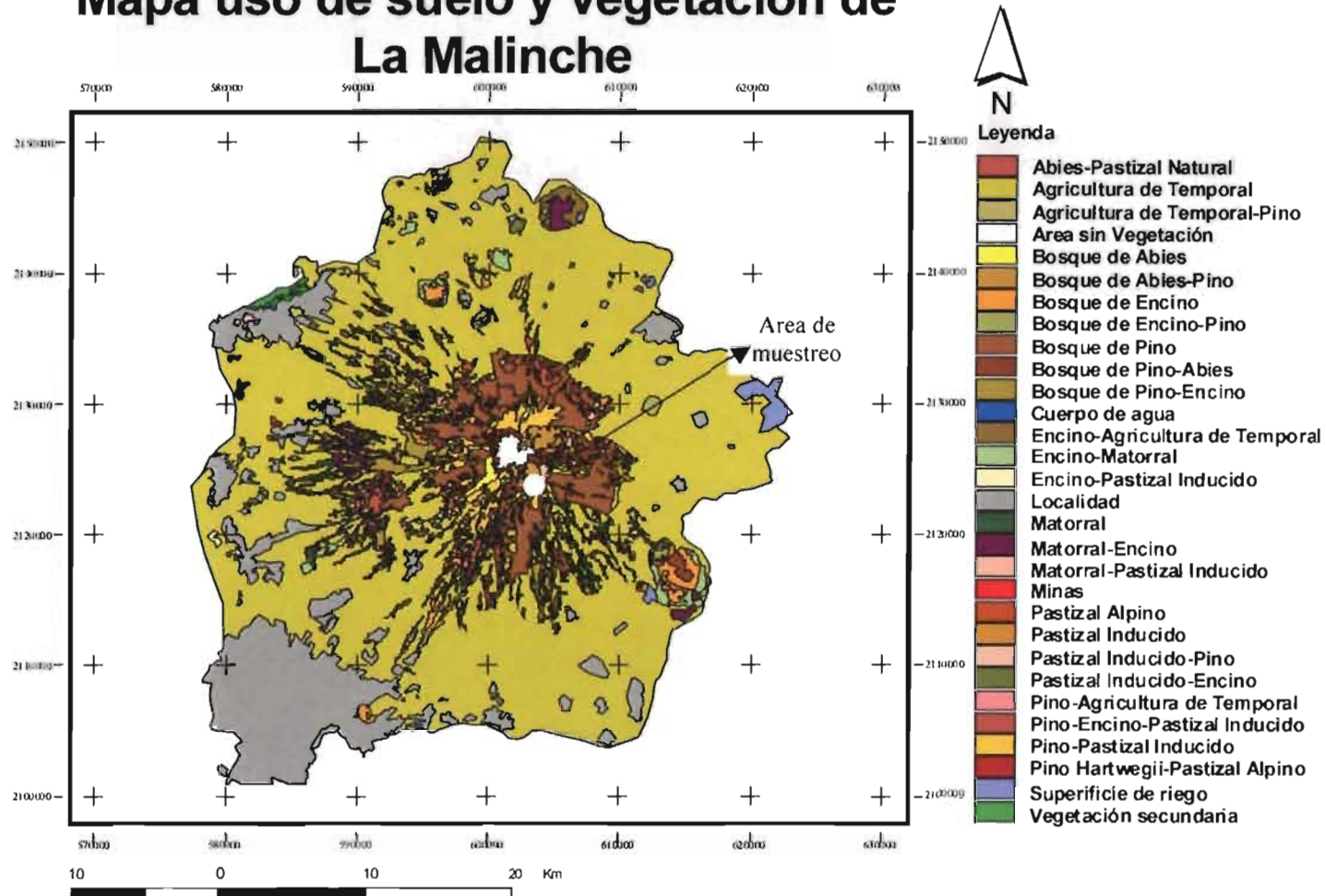


Figura 1.5. Mapa de uso de suelo y vegetación de La Malinche, Tomado de Arellano *et al.* (2001).

1.4.7 Área 2. El Pelado: Este volcán se localiza al sur del Distrito Federal (Figura 1.2), forma parte de la Sierra Chichinautzin, la cual actúa como el límite sur de la Cuenca de México. Políticamente pertenece a la delegación Tlalpan, la cual ocupa la mayor extensión territorial respecto a las demás delegaciones del Distrito Federal, ocupando el área denominada como suelo de conservación ecológica (COCODA, 1984). El volcán Pelado está constituido por un cono cinerítico con una altitud de 3 620 msnm, El Pelado forma el parteaguas de la Cuenca de México al norte y al sur de la cuenca del Balsas. Las pendientes del área de estudio son de gran importancia ya que ayudan a minimizar que el suelo sea transformado para la agricultura (González, 1982).

1.4.8 Clima

La clasificación climatológica es dada por García (1988) para el área de El Pelado como: C (W₂) (w) (B') i. Este clima corresponde a templado subhúmedo, el más húmedo de los templados subhúmedos con lluvias en verano con un porcentaje de lluvia invernal menor al 5% de la anual, semifrío con verano fresco y largo, con una temperatura media anual entre 5 y 12°C, temperatura media del mes más frío entre -3 y 18°C y cuando menos cuatro meses con temperatura mayor a 10°C; con poca oscilación térmica entre 5 y 7°C.

Se localiza dentro de la isoterma media anual de los 10°C, presentando las temperaturas más altas en los meses de mayo y junio, con aproximadamente 18°C. En los meses fríos que corresponden a diciembre y enero, las temperaturas pueden llegar por debajo de los 0°C en años muy fríos. Igualmente, está dentro de las isoyetas de los 1 200 y 1 500 mm, siendo los meses de julio y agosto los más lluviosos con hasta 250 mm de precipitación pluvial y los más secos febrero y marzo con aproximadamente 10 mm de lluvia en promedio (González, 1982).

1.4.9 Geología

La región del Pelado cuenta con un relieve montañoso de origen volcánico. La sierra Chichinautzin de acuerdo con Lugo (1984), presentó durante el pleistoceno-holoceno una intensa actividad volcánica, mostrando en la actualidad un relieve con una edad de aproximadamente 60 000 años. Mientras que Martín del Pozzo (1980) establece que la

sierra Chichinautzin, data de los periodos plioceno y pleistoceno, cuando comenzaron a surgir los volcanes que forman la sierra Chichinautzin. La estructura volcánica más importante es el Volcán Ajusco, éste generó varias erupciones volcánicas y la última obstruyó el cráter. Con la energía geológica almacenada (Martin del Pozzo, 1980) se formaron volcanes secundarios en los alrededores, siendo el Xitle el último en hacer erupción hace aproximadamente 2 400 años, sepultando a la mayoría de la población de Cuicuilco (Mooser, 1975). Entre las rocas más importantes que se pueden encontrar en la región, sobresalen los basaltos, las andesitas, los cuarzos y las pómez.

El Pelado (3620 msnm) es considerado como una de las más perfectas formas cónicas del Sistema Volcánico Transversal, formado en un terreno relativamente plano con una altura de 180 m y un diámetro basal de 1 050 m, mientras que su cráter está conformado por un diámetro de 450 m y 45 m de profundidad (Siebe *et al.*, 2004). El Pelado consiste en un cilindro de tipo estromboliano predominantemente estratificado, la estimación de partículas medias se encuentran en el rango de 1-10 cm. Esto indica que los fragmentos de escoria fueron relativamente frescos, emplazados por una alta columna volcánica, con fragmentos de escoria y bombas en una matriz de lapilli fina y ceniza. Sus principales flujos de lava se asocian con las fisuras de los flancos (Figura 1.6). Los dos flujos más largos siguieron los valles pre-existentes con dirección S-SE y N-NE. El primero es el más largo con 8.25 km y fue construido al margen oriental de los conos cineríticos Tesoyo y Tres Cumbres. El segundo, fue canalizado a través de un valle entre los conos cineríticos Oyameyo y Mezontepec, con una distancia de 6.75 km (Siebe *et al.*, 2004).

1.4.10 Hidrología

El área corresponde a un tipo de relieve reciente, el cual se caracteriza por la naturaleza de su material volcánico poroso y fracturado, éste ocasiona que la red hidrográfica esté conformada por arroyos de carácter intermitente que por lo general recorren cortos trayectos para infiltrarse en áreas de mayor permeabilidad, por lo que constituye una importante área de recarga de los mantos acuíferos (González, 1982).

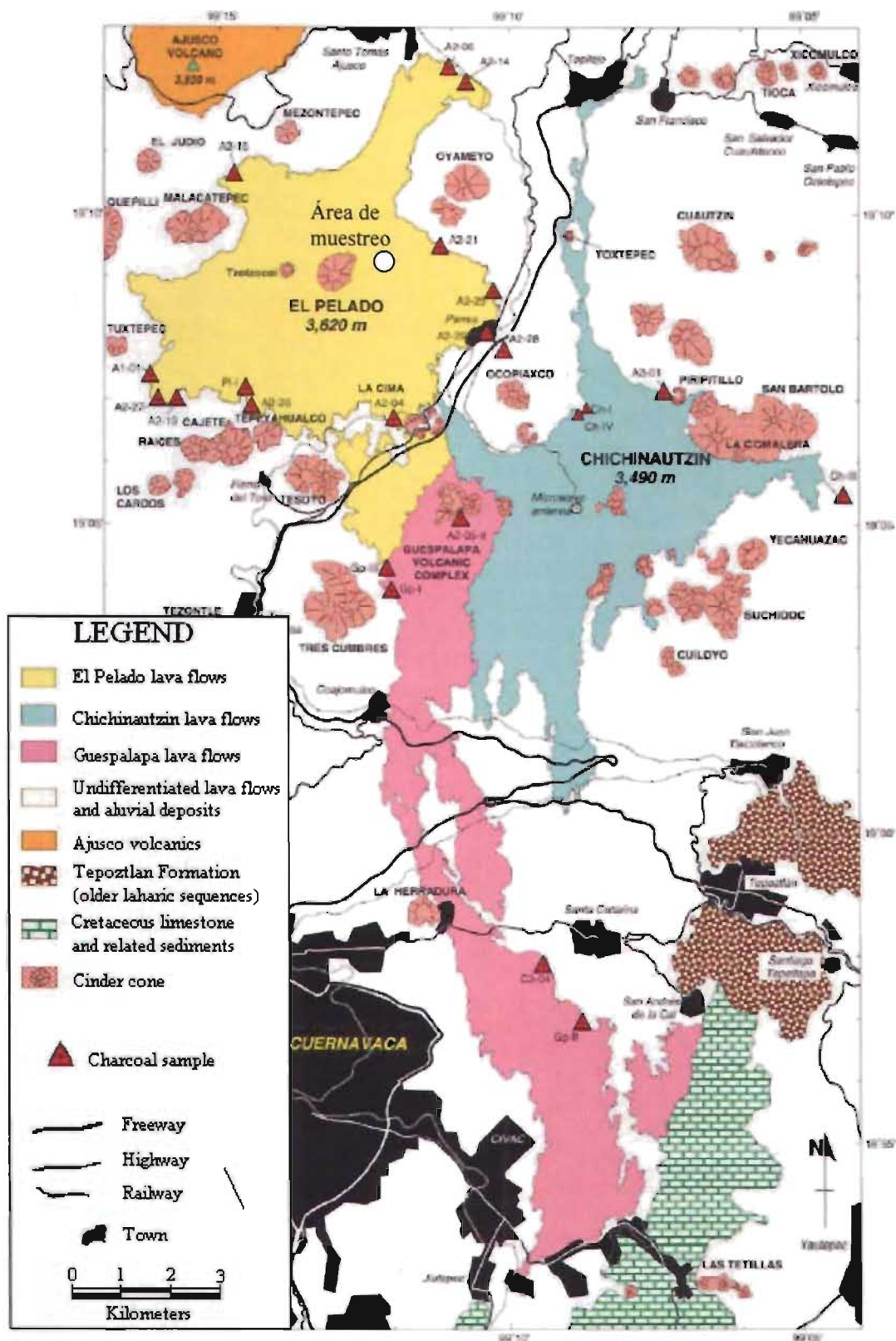


Figura 1.6. Mapa geológico del área de El Pelado. Tomado de Siebe *et al.* (2004).

Actualmente, sólo existen los cauces de los ríos San Buenaventura, San Juan de Dios y Parres, este último se localiza cerca del pueblo del mismo nombre y nace en el piedemonte del cerro El Guarda desaguardo en la presa San Lucas en Xochimilco (Martin del Pozzo, 1980).

1.4.11 Suelos

Los suelos del área de El Pelado presentan variaciones en color y textura. Los de color pardo y con textura de ligera a media provienen de andesitas y los de color negro de cenizas volcánicas que están localizados principalmente por arriba de los 3 000 msnm (Benítez, 1986). Los suelos predominantes en el área de muestreo de acuerdo con CETENAL (1979) son:

- Litosol de clase textural media que se caracteriza por tener un solo horizonte no mayor a 25 cm de profundidad, algunos pueden ser fértiles o infértiles, arenosos o arcillosos, contienen menos del 10% de partículas finas y son susceptibles a erosionarse dependiendo de su ubicación topográfica, proviene de los derrames de lava de El Pelado conformados por rocas de tipo basáltico (Figura 1.7) y son utilizados para uso forestal.

- Andosol húmico y mólico con clase textural media, se encuentran en áreas de actividad volcánica reciente, desarrollados sobre depósitos de caída cenizas volcánicas, se caracteriza por tener una capa superficial de color oscuro y por ser esponjosos o muy sueltos, predomina la textura franco limosa, tiene la propiedad de retener el fósforo.

- Feozem háplico, su característica principal es una capa superficial oscura, suave y rica en materia orgánica.

Se infiere de estos suelos que son poco desarrollados, ya que presentan una secuencia de formación de horizontes AC y AR con alta posibilidad de erosionarse. La pendiente y la profundidad de estos suelos es muy variable, ya que pueden encontrarse suelos desde someros donde la roca madre aflora en la superficie, hasta muy profundos y ricos en materia orgánica producto de un lento y largo proceso de desarrollo que puede tomar varios miles de años (son escasos y en algunos lugares ya se han perdido por la erosión) (Benítez, 1986).

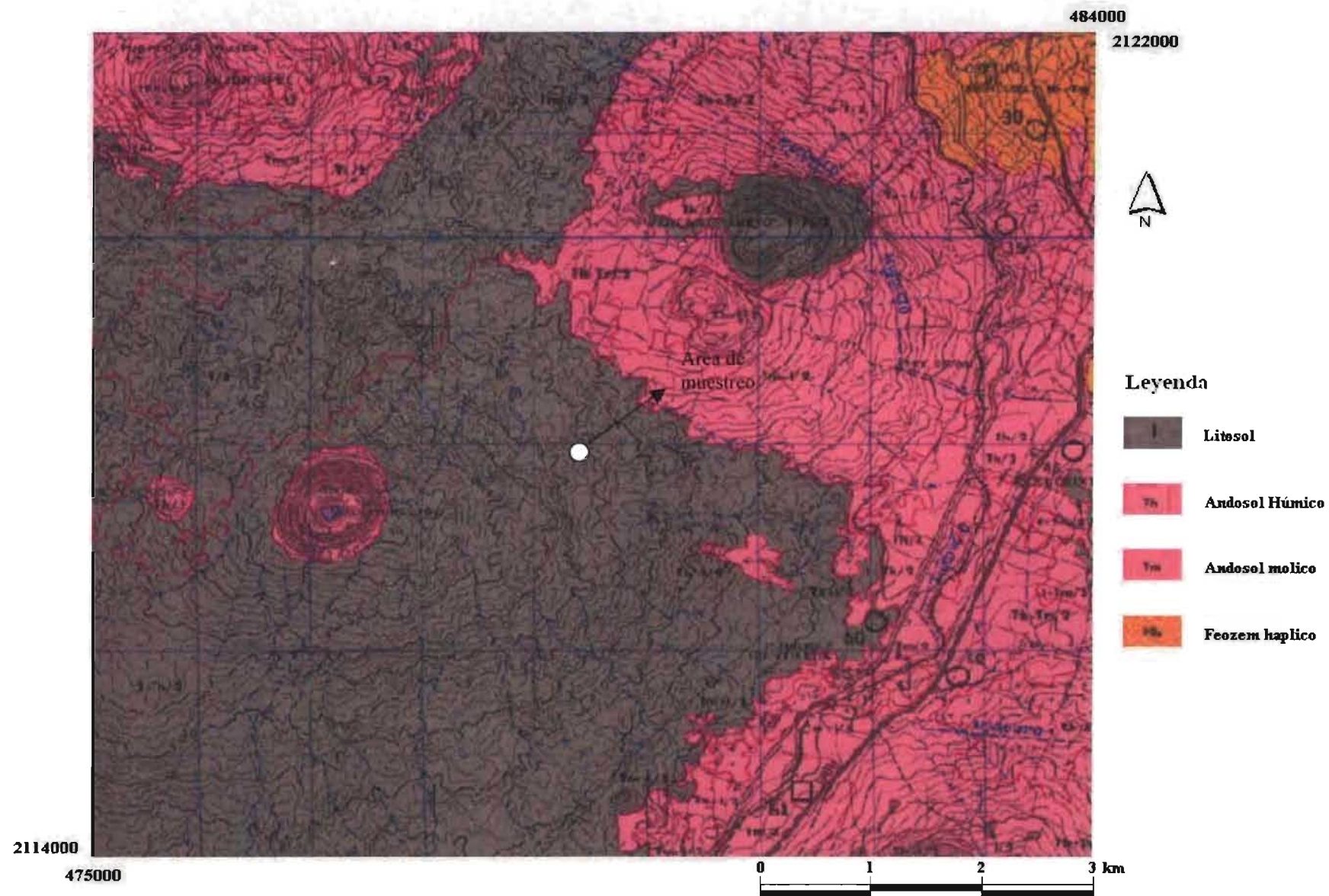


Figura 1.7. Mapa Edafológico del área de El Pelado. Tomado de CETENAL (1979).

1.4.12 Vegetación

La delegación Tlalpan de acuerdo con Torres (1998), es la segunda delegación con mayor cantidad de hectáreas con cubierta forestal (4 358 ha), por lo que se considera un área importante en la generación de oxígeno y en la recarga de los acuíferos de la Ciudad de México. Aunque, se presenta un gran deterioro en la frontera con el área urbana debido al desmonte, la agricultura y las invasiones de terrenos para vivienda. La vegetación, se constituye de estratos como el herbáceo y el arbóreo. En el primer estrato crece una nutrida vegetación, en donde se localizan el zacate grueso, zacatón de cola de ratón, zacayumaque, zacate blanco, pasto de escoba y pasto amarillo (Torres, 1998). A manera de grandes manchones y en el cráter del volcán se encuentra lo que Rzedowski (1978) denominó como pastizal antropogéneo o zacatonal de pino subalpino característico de las partes frías de casi todas las serranías altas de México. Estos zacatonales se establecen comúnmente debido al efecto continuo de la tala, quema y pastoreo o aun por efectos naturales como podría ser la tendencia a producirse cambios en el suelo que favorecen el mantenimiento del zacatonal. En el segundo, pirul y encino de especies duras, pino cerca del Xitle y en la región del Ajusco; también existen variedades como el ocote, jacalote, oyamel y aile (Figura 1.8). Hacia la región montañosa se constituye de especies de bosque de coníferas y diversas especies de cedros.

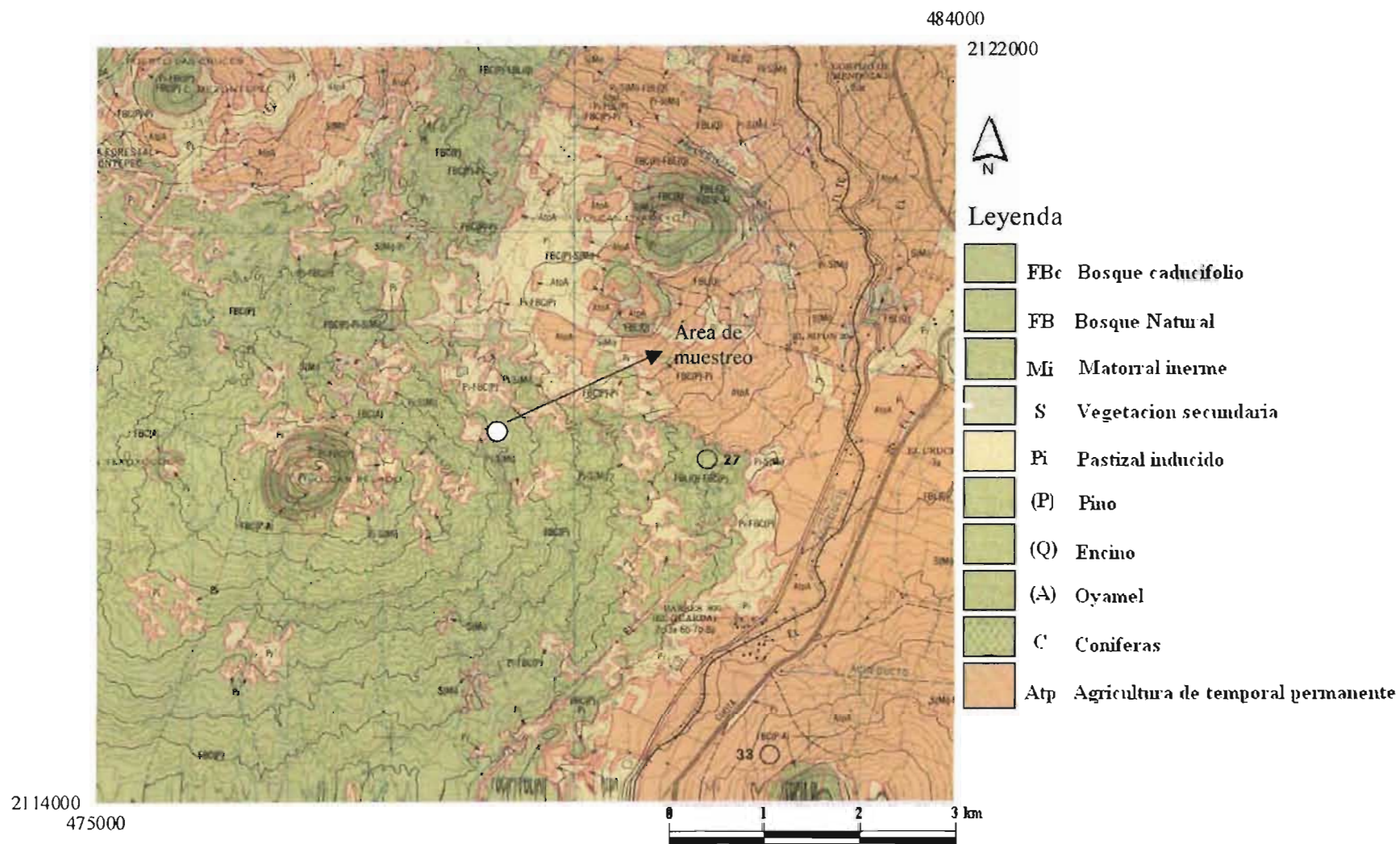


Figura 1.8. Mapa Uso de suelo y vegetación del área de El Pelado. Tomado de INEGI (1983).

1.5 Marco conceptual

Dentro del marco conceptual, las definiciones o conceptos que se mencionan a continuación, han sido tomados de estudios de autores especializados. Para las definiciones se consideraron los términos apropiados que fueron utilizados en el presente trabajo.

1.5.1 Bosque

El bosque es una de las formas de vida fisonómicas básicas, por medio del cual las comunidades bióticas pueden ser clasificadas o definidas en función de los árboles que lo componen, que son los que le dan a la comunidad su fisonomía característica (Spurr y Barnes, 1980). Los bosques son de gran importancia ecológica y económica, debido a los recursos naturales existentes que contribuyen a la dinámica de la biosfera y al ciclo hidrológico, entre otras. Estas comunidades forestales se desarrollan en un ambiente biofísico compuesto por la atmósfera que rodea las porciones aéreas y el suelo que incluye las capas subterráneas (Spurr y Barnes, 1980).

Los componentes que destacan en el bosque son el suelo y la vegetación. La definición del suelo dada por la Comisión Nacional del Agua (1990) es:

El suelo es la colección de cuerpos naturales sobre la superficie terrestre, la cual contiene materia viva y es capaz de soportar plantas en forma natural. Su límite superior es el aire o agua poco profunda, el límite inferior incluye a los horizontes cercanos a la superficie que se diferencia del material rocoso subyacente como resultado de las interacciones a través del tiempo, clima, organismos, material parental y el relieve. En sus márgenes limita con aguas poco profundas o con áreas estériles de roca o hielo.

Por su parte Sala y Batalla (1996), definieron que la Geografía estudia al suelo como un conjunto geográfico y como un bien que hay que preservar de los procesos de erosión y degradación.

Si bien es cierto que un bosque se define en función de sus árboles y que el suelo es una colección de cuerpos naturales, es preciso mencionar que se considera a un suelo forestal como cualquier suelo que se ha desarrollado bajo la influencia de una cubierta forestal (Spurr y Barnes, 1980). Los suelos forestales se diferencian de los demás suelos, en condiciones muy específicas que sólo ellos poseen, como la protección de la cubierta

forestal (García-Quiroz, 2003). Este punto de vista reconoce los efectos singulares del arraigamiento profundo de los árboles, los organismos específicos que se relacionan con la vegetación, así como la capa de *litter* y la lixiviación favorecida por los productos de su descomposición en la génesis del suelo (Pritchett, 1986). La formación del suelo forestal comienza con la caída de hojas hasta su descomposición. Al principio de esta formación, la proporción de mantillo puede ser mayor que la proporción de la descomposición, esto es que se alcanzará un equilibrio entre la materia orgánica y el grado de descomposición, asimismo, la capa del suelo forestal se desarrolla a mayor velocidad bajo condiciones de buen drenaje (Spurr y Barnes, 1980). El suelo tiene cuatro constituyentes principales, minerales, materia orgánica, aire y agua, asociados con estos constituyentes presenta una alta cantidad de organismos vivientes.

La importancia de un suelo se manifiesta en la vegetación y los árboles de acuerdo con cuatro componentes básicos que Bockheim (1991) describe:

1. Ofrece soporte mecánico.
2. Es la fuente de retención y transmisión del agua y gases.
3. Los macro y microorganismos utilizan al suelo como su hábitat natural.
4. Los suelos retienen, intercambian y fijan sustancias nutritivas.

Un suelo se desarrolla de acuerdo a la posición topográfica, misma que proporciona un índice de su estabilidad y de la posibilidad de su conservación y desarrollo. El punto de vista de Hardy (1970), es que el relieve es el factor decisivo en cuanto al predominio de los procesos de denudación sobre los procesos de intemperismo de las rocas en la formación del suelo. El relieve, se define como la configuración del terreno y actúa como un factor en la formación de suelo en dos aspectos: en el control de la erosión geológica y en el control de la relación agua-suelo.

Por lo general, los suelos de los dorsos de ladera se consideran como los menos estables debido a que están expuestos a los procesos erosivos, aunque algunos pueden llegar a la madurez (Hardy, 1970; Galicia *et al.*, 1995). Las formas del relieve como los cauces, son formas muy activas dentro del ciclo de denudación, sus laderas cambian de convexas a

rectas y luego a cóncavas. Las tres principales porciones de una ladera se pueden observar en la Figura 1.9. Asimismo, García y Maass (1998), mencionan que el relieve afecta el contenido de la materia orgánica y los nutrientes del suelo, modificando las características microclimáticas, el contenido de humedad y el movimiento del agua dentro y fuera del perfil del suelo.

La siguiente relación considera que se modifica al lecho de la corriente en sección horizontal, dependiendo la relación entre gradiente y denudación de acuerdo con Hardy (1970).

1. Cima o superficie cumbral. Se localiza en la parte alta y cuenta con un terreno casi plano, en donde existe poca velocidad de flujo, que provoca un transporte reducido de material, por lo que se presenta poca abrasión. Los productos de la intemperización se acumulan.
2. Dorso de ladera. Se localiza en la parte media de la ladera y cuenta con pendientes pronunciadas, en donde se desarrolla una alta velocidad de flujo que provoca alta capacidad de transporte, ya sea por condiciones hídricas o gravitacionales y una fuerte abrasión. Remoción de los productos de la intemperización tan pronto se forman.
3. Cauce. Se presenta en las partes bajas con terreno plano, en donde existe baja velocidad de flujo provocando que los procesos como el transporte y abrasión sean prácticamente mínimos.

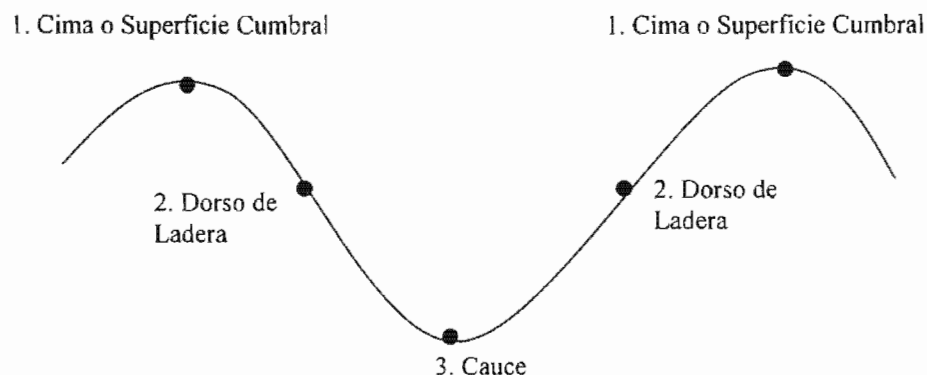


Figura 1.9 Porciones de una ladera en forma generalizada.

Una conclusión de la relación explicada por Hardy (1970), es que los dorsos de laderas muestran menor infiltración y más escurrentía, razón por la que la infiltración decrece significativamente con el incremento de la pendiente de la ladera, esto debido a la reducción en el tiempo disponible para que la lluvia se infiltre (Bergsma *et al.*, 1996).

1.5.2 Fuego

El fuego, es conocido como la liberación de energía en forma de luz y calor, debido al proceso de combustión (Aguirre, 1978). Para que éste exista se requiere de oxígeno-calor-combustible (Figura 1.10), en donde si alguno falta, el fuego no se logra producir (Rodríguez, 1996). Ahora bien, un incendio forestal es la propagación libre del fuego sobre la vegetación del bosque (Pritchett, 1986). DeBano *et al.*, (1998) define a un incendio natural como el fuego originado por la naturaleza (p.e. un rayo o un tipo de combustión espontánea), e incendio antrópico, el fuego causado por una o más personas con o sin motivo aparente.

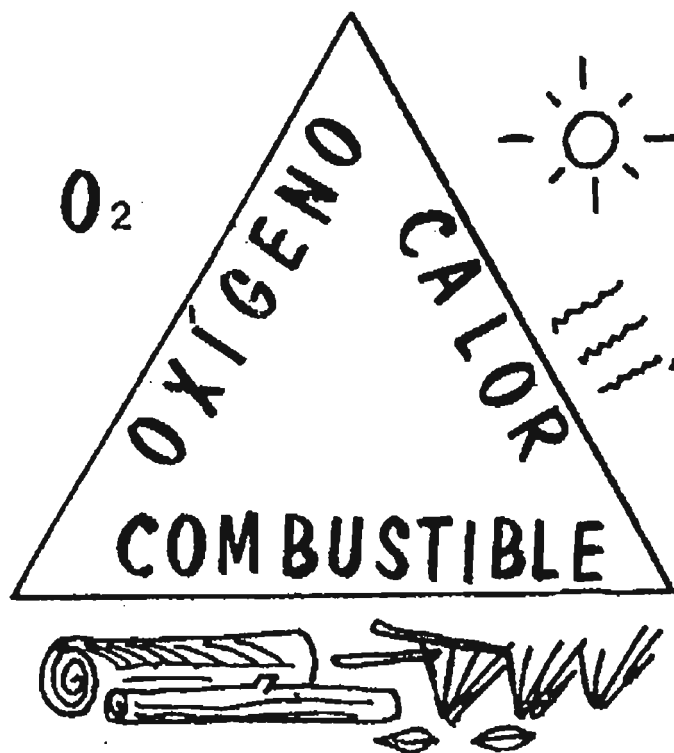


Figura 1.10 Elementos necesarios para la generación del fuego (Rodríguez, 1996).

Los incendios son el fenómeno dominante en la historia forestal. La vida para muchas especies forestales literalmente empieza y termina con los incendios. El incendio, es a la vez un factor cuyos efectos han sido incorporados desde hace mucho tiempo a las adaptaciones de las especies y a la dinámica del ecosistema forestal, inclusive la exclusión del fuego puede considerarse como una perturbación. Sin embargo, un incendio forestal puede interrumpir y alterar enérgicamente su desarrollo dependiendo de la intensidad y frecuencia del fuego (Maass y Jaramillo, 1999). Por su parte Cooper (1961), menciona que existen ecosistemas en donde los incendios ocurren naturalmente con organismos y comunidades adaptados y dependientes de ellos como las especies de pinos cuyas semillas requieren ser calentadas para su germinación.

Tipos de incendios forestales

Los tipos de incendios forestales de acuerdo con Rodríguez (1996), son tres: subterráneos, superficiales y de copa (Figura 1.11) y tres niveles de intensidad de un incendio forestal (bajo, moderado y alto). Dentro del primer tipo de incendio, se quema el mantillo y las raíces bajo la superficie del suelo no tienen llamas y pueden matar la mayor parte de las plantas por las raíces, regularmente adquieren una combustión lenta y generan altas temperaturas. Este tipo de incendio puede llegar a ser muy peligroso debido a que en la mayor parte de las ocasiones aparenta ser controlado, pero por medio de las raíces puede seguir avanzando y volver a rebrotar. Los incendios superficiales, son los más comunes en México, pues al ir avanzando consumen materiales combustibles que se localizan en la parte superficial del suelo como el mantillo, herbáceas, troncos, arbustos y árboles jóvenes. Los incendios de copa, consumen por completo los árboles, propagándose de copa en copa como por la superficie. Este tipo de incendios son tal vez los menos frecuentes pero son los más peligrosos y más difíciles de controlar (Cedeño, 1999).

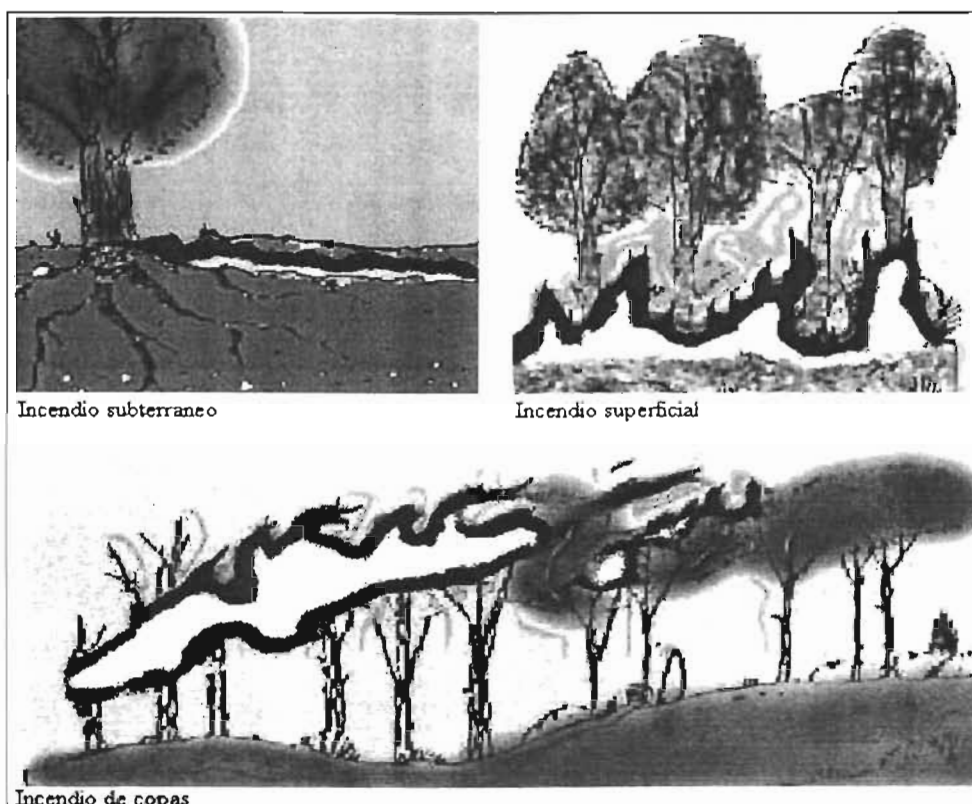


Figura 1.11. Tipos de incendios forestales. Tomado de Cedeño (1999).

Niveles en la intensidad de los efectos de un incendio forestal: de acuerdo con Rodríguez (1996).

-Bajo. La materia orgánica es quemada por incendios superficiales que alcanzan temperaturas de hasta 250°C capaces de eliminar el tejido vivo a 2.5 cm de profundidad.

-Moderado. La materia orgánica se quema en el horizonte superficial y la estructura del suelo no se altera visiblemente.

-Alto. La materia orgánica es reducida a cenizas, el color y la estructura del suelo se ven afectadas notablemente, pueden alcanzar temperaturas de 700°C capaces de eliminar el tejido vivo a 5 cm de profundidad.

Las temperaturas desarrolladas durante un incendio forestal, se describen de acuerdo con Fassbender y Bornemisza (1994), quienes mencionan que son inconstantes y que si sobrepasan los límites biológicos pueden conducir a la esterilización parcial o total del suelo. Las temperaturas superiores a 60°C son críticas, debido a que producen

desnaturalización de las proteínas. Entre 80 y 100°C el proceso de oxidación de la materia orgánica se acelera. Con temperaturas mayores de 300°C se desprenden nutrientes vitales del suelo como el nitrógeno, en forma de óxidos, y en casos extremos se pueden llegar a producir temperaturas de hasta 800°C, mismos que tienen el poder suficiente para matar por completo cualquier tipo de vegetación.

Por su parte Pritchett (1986), agrupó a los incendios forestales en a) naturales, b) planeados y c) prescritos:

a) Los incendios naturales, pueden ser destructivos en la cubierta forestal y el ambiente, debido a que arden lo suficiente para exterminar la mayor parte o en su totalidad, la vegetación que cubre la superficie del suelo. b) Los incendios planeados, son utilizados con el fin de generar un cambio de uso de suelo, principalmente para realizar actividades de tipo agrícola y ganadera. c) Los incendios prescritos, son necesarios debido a que son empleados para el manejo de los ecosistemas naturales con el propósito de reducir el volumen del material combustible que podría provocar incendios de gran energía; estimular la obtención de semillas para aumentar su producción; reducir enfermedades y plagas que puedan afectar directa o indirectamente la vegetación; controlar la existencia de otro tipo de especies no deseables y estimular el hábitat de la vida silvestre.

Ahora bien, los incendios forestales tienen frecuencia, intensidad y patrón de quemado heterogéneo, para la propagación de un incendio, parte fundamental en su desarrollo son las condiciones meteorológicas, los combustibles, la configuración del terreno y las características del área (Aguado y Camia, 1998). Por lo que el comportamiento del fuego dependerá de las características antes mencionadas, mismas que deben de conocerse en la elección de una estrategia cuando se trabaja para la extinción de un incendio forestal que de acuerdo a su comportamiento, ritmo de propagación e intensidad sirvan para desarrollar el plan adecuado de extinción (Cedeño, 1999).

Factores que determinan el comportamiento del fuego:

a) Las condiciones meteorológicas momentáneas. Estas condiciones determinan el comportamiento del fuego y regulan en gran medida la humedad de los combustibles, esto es determinante debido a que todo tipo de material seco combustiona con mayor facilidad que el material que tiene alto porcentaje de humedad (Maass y Jaramillo, 1999). El viento es el factor meteorológico de mayor importancia, ya que el oxígeno que aporta y su desplazamiento son los que provocan la inflamación del material más próximo.

b) La orientación del terreno. Es un factor fundamental debido a las horas de energía solar recibidas, la cantidad de precipitación y a su vez asociada a la dirección e intensidad de los vientos (Whelan, 1998). Las laderas que reciben menos luz solar y son mas frías y húmedas son las orientadas al norte, mientras que las laderas orientadas al sur y suroeste tienden a ser más calientes y más secas (Galicia *et al.*, 1999) debido a que están expuestas a los rayos del sol durante las horas más calientes del día, el resultado es que en las laderas expuestas al sur los incendios forestales son más frecuentes y se extienden a mayor velocidad que en las laderas al norte (Rodríguez, 1996).

c) Los combustibles. Constituyen un grupo heterogéneo de materiales que están sobre la superficie del suelo o cerca de ella. Los combustibles son todo aquel material vegetal existente en el bosque, como troncos, hojas, raíces, ramas, arbustos o árboles, que constituyen la materia prima para la combustión (Villers y López-Blanco, 2004; Johnson, 1992; Nelson, 2001). Una característica de la vegetación que funge como material combustible es que tiende a reducir la evapotranspiración durante la época seca (Martín *et al.*, 1998). Asimismo, ocurre que cuando grandes cantidades de combustibles secos son quemados sobre el suelo, éstos se convierten en incendios de alta severidad (Rodríguez y Sierra, 1995). Igualmente, se establece que un período seco de quince días es suficiente para que un incendio cuente con mayor probabilidad de existir.

d) La topografía, de acuerdo a Fuller (1991), es la forma o fisonomía de una región y el fuego puede variar en un área pequeña. Las superficies convexas están expuestas a fuertes vientos y en contraste son más secas que el promedio de la región. Las superficies cóncavas

tienden a estar protegidas de los fuertes vientos y están más húmedas (Spurr y Barnes, 1980). El efecto de ladera en el frente de un fuego es similar al efecto del viento, las flamas de un incendio se desplazan y arden más rápido en pendientes pronunciadas disminuyendo la humedad y aumentando la temperatura de los combustibles que están delante del incendio y se relaciona directamente con la cantidad de material combustible y con la altitud, dando menor número de combustibles donde existan mayores alturas (Whelan, 1998). La topografía de montaña o escarpada provoca vientos turbulentos que intensifican el fuego y encausan los modelos de flujo de aire (Young, 1991). Un ejemplo es la presencia de cañadas y cañones (Figura 1.12), pues facilitan la propagación del fuego ya que actúan como corredores de aire por la estrecha forma de “U” del terreno y hacen más agresivo el comportamiento del incendio (Rodríguez, 1996)

e) La pendiente o ángulo que forma cualquier parte de la superficie terrestre, juega un factor de importancia durante los incendios forestales (Wilson, 1968), ya que por convección favorece el desplazamiento de aire caliente. De acuerdo con Viegas (1989), la velocidad de propagación se duplica por cada 10% de aumento en la pendiente.

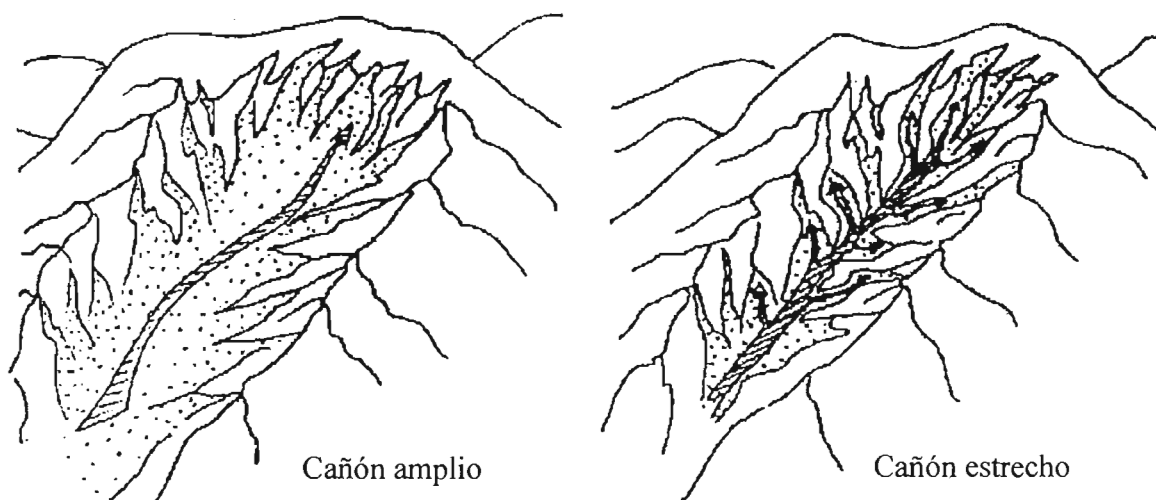


Figura 1.12 Efecto de las cañadas con el movimiento del aire (Rodríguez, 1996).

f) La altitud también está relacionada con la temperatura, ya que conforme aumenta la altitud, disminuye la temperatura y provoca una mejor condición hídrica de los materiales combustibles que evita que éstos ardan a altas temperaturas.

1.5.3 Incendios forestales como un fenómeno o peligro natural y antrópico.

Actualmente, los fenómenos como los incendios forestales generan pérdidas de vegetación, suelo, agua, e infraestructura, teniendo un marcado efecto en países en vías de desarrollo como México (CONAF, 1998). Un incendio forestal, hoy en día, más que un fenómeno llega a ser un peligro, pues los incendios son causados con o sin motivo aparente donde el infractor puede o no ser beneficiado, pero si el incendio no es controlado inmediatamente adquiere el carácter de destructivo (DeBano, 1998). Por lo tanto, las modificaciones que producen los incendios forestales a la naturaleza constituyen parte fundamental en la determinación del peligro de incendios forestales (Martin *et al.*, 1998).

La importancia de los peligros naturales (entre ellos los incendios forestales), es mencionada por Burton *et al.* (1978), quienes describieron siete parámetros que pueden afectar la respuesta humana para su control, dada en una escala cualitativa.

- 1.-Magnitud (alta-baja). Referida a la energía que delimita un evento.
- 2.-Frecuencia (poco frecuente-común). Implica cómo a menudo un evento de cierta magnitud, ocurre en una cierta cantidad de tiempo.
- 3.-Duración (corto-largo). Período de tiempo en el que el evento persiste.
- 4.-Área de extensión (extendido-limitado). Es el espacio físico afectado.
- 5.-Velocidad de propagación (rápido-lento). Cantidad de tiempo entre la primera aparición y el punto culminante de un fenómeno.
- 6.-Dispersión espacial (difusa-concentrada). Aplicada para el espacio probable por todos los eventos de un tipo de amenaza específica.
- 7.-Espacio temporal (regular- al azar). Puede ser relativamente regular en el caso de peligros estacionales o cíclicos y al azar.

Gares *et al.* (1994), argumentaron que un evento extremo individual puede generar otro evento extremo de diferente tipo, pero que está con relación al anterior y reconocen que siempre existe un proceso (mecanismo disparador) y llaman peligro geomorfológico al proceso que modifica el paisaje y tiene repercusiones al ambiente y al ser humano.

De acuerdo con Spurr y Barnes (1980), los incendios forestales pueden presentar un peligro directo e indirecto sobre la calidad del sitio a través de sus efectos. Los peligros directos son debido a dos fuentes principales, el quemado de la materia orgánica sobre y debajo del suelo mineral y el calentamiento de las capas superiores del suelo, ya que libera dióxido de carbono, nitrógeno y deposita los minerales en forma de ceniza en el suelo y la atmósfera (Fassbender y Bornemisza, 1994). Los peligros indirectos dependen principalmente de los cambios sufridos en la vegetación después del incendio. Entre los más importantes, son la erosión del suelo, la lixiviación de los nutrimentos y la escorrentía o una sucesión vegetal.

1.5.4 Propiedades de los suelos

Uno de los mayores efectos del fuego radica en el cambio de las propiedades tanto físicas (color, textura, densidad aparente, densidad real, porosidad, estabilidad de agregados y contenido de humedad), como químicas de los suelos (materia orgánica, pH, capacidad de intercambio catiónico, carbón orgánico, fósforo, y cationes Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} intercambiables). A continuación, se define cada una de estas características de los suelos y se da una breve descripción de los cambios que se pueden presentar después de un incendio forestal.

1.5.5 Propiedades físicas

Las propiedades físicas del suelo, son aquellas características, procesos o reacciones de un suelo que son causadas por las fuerzas físicas que pueden ser descritas o expresadas en términos de ecuaciones físicas (SSSA, 1965). Cuando las características físicas se manejan adecuadamente, es posible tener el balance de agua y aire, incrementar la dinámica de los ciclos biogeoquímicos, facilitar el desarrollo radical de la vegetación, aumentar la resistencia a la erosión y disminuir el efecto de los procesos degradativos (Arshad *et al.*, 1996).

Textura

La textura del suelo es la que determina la proporción de los tres tamaños de partículas los cuales se dividen en suelos de textura fina, media y gruesa. La textura es una de las más importantes características del suelo, ésta puede determinar algunos rasgos de otras

propiedades; Birkeland (1999), mencionó que la variación de la textura de un horizonte puede ayudar a descifrar la historia pedogenética de un suelo y asociarlo a la superficie geomórfica. Los suelos forestales arenosos a menudo sostienen pinos, oyamel, robles y otros árboles con bajo contenido de humedad y requerimientos nutritivos. Por el contrario, los suelos limosos y arcillosos en general sostienen árboles con altas necesidades de humedad y sustancias nutritivas como el arce, el nogal y el olmo, entre otros (Young, 1991). Wells *et al.* (1979) indican que un incendio forestal necesita ser muy intenso para influir directamente en la textura del suelo.

Densidad aparente

La densidad aparente del suelo es la relación del espacio ocupado por los sólidos y los espacios de los poros conjuntamente y se expresa en gramos por centímetro cúbico (Cavazos y Rodríguez, 1992). La Tabla 1.3 describe los valores medios de densidad aparente de acuerdo al predominio del tamaño de las partículas que un suelo contiene.

Tabla 1.3. Valores medios de densidad aparente

Suelos	D_a (g/cm^3)
Arenas	1.6 - 1.7
Francos	1.3 - 1.4
Arcillas	1.0 - 1.2
Suelos orgánicos	0.7 - 1.0

Tomado de Aguilera y Martínez (1980).

Esta propiedad es un factor de crecimiento edáfico indirecto, pues modifica la aireación del suelo y el crecimiento radicular. Después de considerar los factores que afectan la densidad aparente del suelo, esta propiedad se puede modificar sólo a través de aportaciones de materia orgánica y mediante labores culturales que mantengan o mejoren una estructura favorable (Gandoy, 1991). Aguirre (1978), menciona que a una pulgada de profundidad la densidad aparente presento un incremento como resultado de la destrucción parcial del material orgánico por el fuego.

Humedad

Palmer y Troeh (1980), por su parte indican que el movimiento del agua en el suelo se lleva a cabo por tres medios: gravedad, acción capilar y gradiente de temperatura. Pero la

humedad no sólo influye en la distribución y crecimiento de la vegetación, también actúa como un solvente para transportar nutrientes hacia las raíces de la vegetación.

La humedad del suelo se reduce debido a diversos factores, al ser destruida la cubierta forestal disminuye la capacidad de absorción y retención del agua en la capa orgánica. Un suelo quemado aumenta su temperatura y tiende a incrementar la evaporación (Buckman y Brady, 1977). También los materiales calcinados como la ceniza, pueden penetrar en el suelo reduciendo la tasa de infiltración del agua y aumentando la pérdida por escorrentía. Si la repelencia del suelo al agua es alta, puede haber flujos laminares, erosión excesiva y reducirse la retención y movimiento del agua (Ternan y Neller, 1999), así como inhibirse la germinación de las semillas y el crecimiento de las plantas.

Densidad real

La densidad real del suelo se define como la masa (peso) por unidad de volumen de las partículas del suelo (sólidos del suelo) y se expresa en gramos por centímetro cúbico (Gandoy, 1991). En clasificación de suelos se ha adoptado el valor de 2.65 g/cm^3 como la densidad real de los suelos, dicho valor se considera como el promedio de los minerales dominantes en un suelo. Sacchi y De Pauli (2002), mencionaron que los valores de densidad real se incrementan después de ser modificadas las características naturales de un suelo.

Porosidad

El espacio poroso de un suelo, es la porción de volumen que no está ocupada por los sólidos orgánicos o minerales. El tamaño, la forma y la continuidad de los poros determina en gran medida los movimientos del agua y del aire en el suelo y las características de los poros están determinados por la estructura. Los poros grandes (mayores de 10μ), transportan el agua; los poros medianos (entre 10 y 0.2μ), retienen el agua disponible para las plantas y los poros pequeños (menores de 0.2μ) retienen el agua no disponible (FitzPatrick, 1996).

Las arenas tienen poros grandes y continuos. En contraste las arcillas, aunque tienen un mayor espacio poroso en las partículas estos son muy pequeños, esto hace que el agua se transmita lentamente. Los suelos forestales, generalmente contienen del 40 al 60% del espacio poroso aproximadamente. Son varios los factores que pueden alterar el volumen de los poros en el suelo como los incendios, debido a la obstrucción de los poros del suelo por partículas más finas (Young, 1991).

Agregados

La agregación del suelo se define como un grupo de dos o más partículas que se adhieren entre sí, las cuales presentan una cohesión mucho más fuerte entre ellas que con las partículas que las rodean (Buckman y Brady, 1977). El origen de los agregados depende de la naturaleza de los minerales arcillosos, contenido de humedad, cationes absorbidos, población microbiana y su actividad y en menor grado de los factores abióticos. Acevedo *et al.* (2001), mencionaron que algunos componentes de la materia orgánica se relacionan con la estabilidad de los agregados del suelo. Se dice que los agregados se estabilizan por la materia orgánica más humificada y que su estabilidad aumenta conforme disminuye su tamaño (Buckman y Brady, 1977).

En los agregados las fuerzas de cohesión son mayores que las de separación. Éstas últimas, pueden ser de impacto y rompimiento, abrasivas y todas aquellas relacionadas con la entrada de agua al suelo, mismas que se relacionan con los fenómenos erosivos y el humedecimiento. Por lo tanto, los factores que incrementan la agregación del suelo son los que aumentan la permeabilidad, la cohesión entre partículas y moderan la entrada de agua al suelo (Foth, 1996).

La estructura del suelo es una propiedad física que puede ser modificada en un incendio forestal e influencia la estabilidad o durabilidad de un agregado y depende substancialmente de la cantidad de humedad que el suelo presente. García-Oliva *et al.* (1999), mencionaron que al quemarse parte de esta materia orgánica se calcina y permite la disgregación del suelo y después por la acción directa de las gotas de lluvia da como

resultado la pérdida de la estructura del suelo y la disminución de la capacidad de infiltración.

1.5.6 Propiedades químicas

El análisis químico elemental de los suelos es un poderoso instrumento para su caracterización y comportamiento (Fassbender y Bornemisza, 1994). La fertilidad, los procesos de regulación de almacenamiento y ciclo de los nutrientes, la disponibilidad y pérdida de nutrientes por volatilización a la atmósfera (Binkley *et al.*, 1993) y la lixiviación, son algunas de las características más importantes del sistema químico en el suelo.

La fertilidad del suelo se define como la capacidad para suministrar elementos nutritivos para el crecimiento de las plantas, son 16 elementos primordiales para el crecimiento, mismos que están divididos en grupos minerales (Tabla 1.4).

Tabla 1.4. Principales nutrientes minerales del suelo.

Nutrientes Primarios	Nutrientes Secundarios	Micronutrientes
Nitrógeno (N)	Calcio (Ca)	Boro (B)
Fósforo (P)	Magnesio (Mg)	Cloro (Cl)
Potasio (K)	Azufre (S)	Cobre (Cu)
		Hierro (Fe)
		Manganeso (Mn)
		Molibdeno (Mo)
		Zinc (Zn)

Fuente: Potash and Phosphate Institute (1997).

Estos nutrientes del suelo tienen un ciclo que se refiere de manera general, al movimiento de los mismos a lo largo de los diversos componentes del ecosistema forestal incluyendo los árboles, la vegetación, la superficie forestal y el suelo mineral subyacente. Cuando los nutrientes llegan al suelo, se pueden retener en los puntos de intercambio o ser asimilados por los árboles, la vegetación y los organismos del suelo. Ahora bien los nutrientes se

añaden al suelo por medio de la precipitación, caída de hojarasca, flujo de tallo e intemperización química de la roca y se pierden del ecosistema por volatilización, erosión, escurrimiento, lixiviación o traslocación por debajo del área de enraizamiento (Spurr y Barnes, 1980).

pH

La reacción del suelo, se refiere a la relación de acidez y basicidad del mismo. Es una propiedad que influye en las características físicas y químicas, y tiene un impacto considerable en la vida microbiana del suelo (Donahue *et al.*, 1988). Los suelos forestales son generalmente más ácidos, esto se debe a que la hojarasca de los árboles es en general ácida y libera iones hidrógeno cuando cae al suelo y se descompone. Por otra parte, los suelos ácidos están propensos a perder minerales por lixiviación; entre más nutrientes sean lavados, mayor será la acidez. La roza y quema de vegetación puede intensificar el proceso de acidificación dado los períodos largos en que el suelo está expuesto a lixiviación y extracción de nutrientes mediante la vegetación, sin ser devueltos al suelo. Wells *et al.* (1979) mencionan que en un suelo forestal quemado, el pH disminuye su acidez de 4.2 a 4.6 en los primeros 5 cm de profundidad, mientras que Jalaluddin (1969), especifica que la incorporación de ceniza por incendios forestales aumenta el pH del suelo.

Materia orgánica

De acuerdo a la SSSA (1965), la materia orgánica del suelo se define como La fracción orgánica del suelo que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo. Esta fracción se determina en general en suelos que pasan por un tamiz con malla de 2 mm de diámetro y se interpreta de acuerdo al porcentaje dado en la Tabla 1.5. Las funciones más importantes de la materia orgánica son: proveer agua, dar aireación al cuerpo orgánico del suelo, retener las sustancias nutritivas e intercambiarlas y que al descomponerse sea una fuente de nutrientes y microorganismos. A medida que se realiza la descomposición de la materia orgánica, los nutrientes minerales son gradualmente transformados en iones para que puedan ser absorbidos por las raíces de los árboles. La parte más estable de la materia

orgánica es el humus que se obtiene después de que se han descompuesto las sustancias vegetales o animales añadidas al suelo y comúnmente es de color oscuro.

Maass y Jaramillo (1999), evaluaron los impactos del fuego en el suelo y describieron al mantillo o materia orgánica como una capa muy importante, porque es reguladora del microambiente del suelo, estabilizando la temperatura del suelo, la capacidad de infiltración, absorbe energía cinética de las gotas de lluvia y disminuye la erosión del suelo; además de que esta capa es vital para los incendios forestales, por que los materiales que la componen intervienen en la propagación del fuego como material combustible. Un incendio forestal, aún de dimensiones menores, puede acabar con esta capa e intervenir en que las características anteriores se vean afectadas.

Carbón orgánico

El carbono ocupa un lugar distinguido en la naturaleza por el hecho de que las plantas lo absorben directamente de la atmósfera a través de sus hojas. El origen del carbono orgánico proviene de los restos vegetales y animales recién depositados en el suelo, la fracción húmica en su proceso de mineralización y humificación, además de las formas inertes de carbón elemental como carbón y grafito. Este se obtiene al multiplicar 1.724 por el porcentaje de materia orgánica, ya que se dice que contiene el 58% de carbón.

Tabla 1.5. Guía para la interpretación de los resultados de materia orgánica y carbón orgánico en el suelo.

MATERIA ORGÁNICA (%)	CARBÓN ORGÁNICO (%)	CLASIFICACIÓN
< 0.60	< 0.35	MUY BAJO
0.60 - 1.80	0.35 - 1.05	BAJO
1.81 - 3.50	1.05 - 2.30	MEDIANO
3.50 - 6.0	2.31 - 3.50	ALTO
> 6.0	> 3.50	MUY ALTO

Tomado de Fassbender y Bornemisza (1994).

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Esta se define por el PPI (1997), como la suma de cationes intercambiables de un suelo; es una medida de la fertilidad del suelo y es una reacción físico-química irreversible. La fuerza de la carga positiva varía dependiendo del catión, permitiendo que un catión reemplace a otro en una partícula de suelo cargada negativamente. Las partículas de arcilla son los constituyentes del suelo cargados negativamente. Estas partículas atraen, retienen y liberan nutrientes cargados positivamente (cationes). Las partículas de arena son inertes (sin carga) y no tienen reacción. La CIC depende de la naturaleza del mineral arcilloso que forma parte del suelo, del tamaño de las partículas, de la cantidad de materia orgánica y de la acidez y alcalinidad del suelo.

Calcio (Ca^{++})

El calcio presente en el suelo, procede de las rocas y de los minerales de los que el suelo está constituido y su contenido total puede variar ampliamente. En los suelos no considerados como calizos, está entre 0.1 y 0.2% mientras que en los calizos puede llegar hasta un 25% (Navarro y Navarro, 2000). Dentro de sus compuestos más importantes están los carbonatos, los fosfatos, feldespatos y anfíboles. Por el efecto de la meteorización, estos minerales van liberando calcio, que al ser solubilizado puede tener diversos destinos como: pérdida por lixiviación, absorción por los organismos del suelo, absorción por el complejo coloidal o reprecipitado como compuestos cálcicos secundarios, principalmente en regiones áridas (Navarro y Navarro, 2000).

Magnesio (Mg^{++})

El magnesio es un elemento muy abundante en la corteza terrestre, según algunas estimaciones, su contenido medio puede situarse en un 23% (Navarro y Navarro, 2000). En los suelos se encuentra como constituyente de numerosos minerales, en su mayoría silicatos, como la biotita, serpentina, olivino, clorita, vermiculita, illita y montmorillonita. El destino de este nutriente dependerá en gran parte de ser absorbido por los microorganismos del suelo, perderse por lixiviación, absorbido o fijado por los coloides o reprecipitado como compuestos magnésicos secundarios, principalmente en regiones áridas (Navarro y Navarro, 2000).

Potasio (K^+)

El potasio presente en los suelos aparece por la desintegración y descomposición de las rocas que contienen minerales potásicos. Dentro de los minerales que se consideran como fuentes del potasio son: los feldespatos potásicos, la moscovita y la biotita. Existe una porción menor que se adhiere debido a la descomposición de restos vegetales y animales (Navarro y Navarro, 2000).

De acuerdo con Fassbender y Bornemisza (1994), las bases de K^+ , Ca^{++} y Mg^{++} se encuentran en forma iónica, en el citoplasma de los tejidos vegetales, mismos que al ser quemados se observa claramente que estos elementos nutritivos son perturbados por la temperatura y pasan a sus formas oxidadas K_2O , CaO y MgO , y al reaccionar con el agua vuelven a estar en sus formas iónicas, K^+ , Ca^{++} y Mg^{++} (Figura 1.13).

Sodio (Na^+)

En la mayoría de los suelos el sodio se encuentra combinado con los silicatos minerales insolubles. La cantidad de sodio total generalmente es inferior a 2%. El sodio soluble o el intercambiable varían desde concentraciones muy bajas a muy altas, dependiendo de la sodicidad y/o salinidad y de la capacidad de intercambio catiónico (SARH, 1978). Sin embargo los suelos salinos y/o sódicos contienen grandes cantidades de sodio soluble e intercambiable.

Fósforo (P)

Este elemento proviene de la descomposición de la roca madre, durante el proceso de intemperización y representa alrededor del 0.1% de la corteza terrestre, considerándose de una forma inorgánica. La aportación proviene principalmente de suelos recientes y de rocas volcánicas, más que de las sedimentarias (Navarro y Navarro, 2000). El fósforo en su forma inorgánica predomina sobre la forma orgánica con excepción en suelos donde la materia orgánica se halla en gran proporción. El fósforo orgánico suele predominar en los perfiles superficiales más que en los subsuperficiales, por la acumulación de materia orgánica.

Generalmente, el fósforo se encuentra en mayor cantidad en suelos jóvenes, vírgenes y en áreas donde la lluvia no es excesiva, debido a que puede perderse por lixiviación.

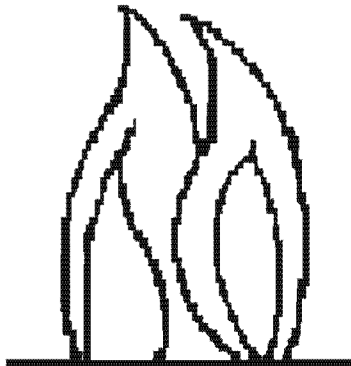
FACTORES	TEMPERATURA	EFEECTO
Material		Volatilización
Humedad		C
Viento		N
		S
		(parcial)
		Liberación
3	300° C 400° C 500° C	P = H_3PO_4
5	200° C 100° C	K = K_2O
10	50° C	Ca = CaO
20	40° C	Mg = MgO
30		Cambios de pH

Figura 1.13. Efecto del proceso de combustión sobre los elementos nutritivos del suelo. (Fassbender y Bornemisza, 1994).

Fassbender y Bornemisza (1994), demostraron que el contenido de fósforo también depende de la textura de los suelos, ya que cuando más fina es la textura mayor cantidad de fósforo existe y mencionan que durante un incendio sus cantidades permanecen constantes, pues se considera un nutrimento estable. Aunque, las temperaturas al momento de la quema son de gran importancia

1.5.7 Efectos del fuego sobre las propiedades físicas y químicas del suelo

La modificación de las características de un suelo se da a través de procesos como la adición, pérdida, transferencia y transformación de los minerales y la materia orgánica. Las características físicas y químicas del suelo determinan el establecimiento y desarrollo de

especies vegetales y biota, pero al mismo tiempo la presencia de estas especies es modificada por los procesos del suelo (Fassbender y Bornemisza, 1994).

La magnitud de los cambios que pueden presentarse en las propiedades físicas depende ampliamente de la severidad del incendio, la proporción de vegetación quemada superficial y bajo la superficie, el estrato forestal consumido, el calentamiento del suelo, la proporción del área quemada y el intervalo de tiempo transcurrido durante los incendios forestales (DeBano, 1991).

Las modificaciones en las propiedades químicas del suelo durante un incendio se relacionan con la rápida transformación u oxidación de los nutrientes contenidos en los materiales orgánicos de la vegetación viva sobre la superficie del suelo (Pyne *et al.*, 1996). La quema difiere de los procesos naturales de oxidación biológica sobre todo con la velocidad que se liberan los nutrientes. En la descomposición biológica, la mineralización de los nutrientes en el material de la cubierta forestal es lenta, pero constante y la mayor parte de los nutrientes son absorbidos por las raíces de las plantas a medida que se liberan. La quema libera rápidamente los nutrientes, una parte de los minerales solubles pueden lixiviarse hacia el suelo más allá de la rizósfera de los árboles y algunos se pierden por volatilización, tales como el F y el N, que se volatilizan a temperaturas entre el rango de 200 a 300°C durante el incendio y los cationes como Ca^{++} , Mg^{++} , Na^{+} , K^{+} , que se volatilizan a mayores temperaturas (DeBano, 1991; Maass *et al.*, 1988).

Los efectos del fuego en las propiedades físicas y químicas, son complejos. Sin embargo, las relaciones en general describen que las propiedades del suelo en contraste con un suelo quemado pueden ser establecidas bajo las siguientes circunstancias de acuerdo con DeBano *et al.* (1998):

- La completa deshidratación del suelo ocurre cuando las temperaturas llegan hasta los 220°C, aunque, esto no significa que las propiedades físicas y químicas, sean afectadas.

- A una temperatura entre 220 y 460°C se quema la materia orgánica del suelo y afecta las propiedades del suelo dependientes de la materia orgánica. Aunque, en parte la destrucción de la materia orgánica puede ser benéfica debido a que provee grandes cantidades de nutrimentos disponibles a las plantas.
- A una temperatura mayor de 460°C se conduce a la hidroxil interrumpe la estructura de los carbonatos. Estos cambios irreversibles producen un suelo con menor porosidad, menor plasticidad y menor elasticidad y dejándolo altamente erodable.

El efecto del fuego consiste en incrementar la cantidad de minerales disponibles, disminuir la acidez, incrementar la saturación de bases y cambiar las condiciones de humedad y temperatura del área del incendio. Otro aporte de los incendios forestales, son las cenizas minerales que facilitan a las plantas la absorción de nutrimentos, si estas cenizas se lavan dentro del suelo las raíces pueden absorber los nutrimentos minerales disueltos en el agua, donde mejora la calidad del suelo temporalmente. Por el contrario, si la ceniza es lixiviada debajo del área de enraizamiento de los árboles, disminuye la calidad del suelo o son perdidas por erosión.

Capítulo 2

Metodología

2.1 Trabajo de gabinete (primera etapa)

La recopilación, selección y depuración de la literatura especializada, fue utilizada como la base de referencia, la cual comprende las características físico-geográficas, en donde los suelos, la geomorfología y los incendios forestales principalmente fungen como la parte central en la presente investigación. Igualmente, el estudio de estos conceptos ayudó a definir los criterios a considerar para el trabajo de campo y de laboratorio aportando las bases técnicas de la metodología.

Se realizaron dos tipos de mapas, los de relieve sombreado y la cartografía temática, con el fin de establecer su localización y sus características geográficas de ambas áreas de estudio. Para los primeros se generó un modelo digital de terreno (MDT), ya que se toma como una representación de la superficie terrestre, el cual incluye las coordenadas X, Y y Z que son registrados en una base de datos, después se aplicó un filtro direccional al MDT que sirve para lograr una tercera dimensión definida en tonos de grises (Arellano, 2001). Los segundos se elaboraron a partir de la digitalización en pantalla sobre una imagen escaneada de los segmentos que conforman los límites de las unidades edáficas o geológicas según sea el caso. Estos mapas se elaboraron de acuerdo a la cartografía existente y procesados en los Sistemas de Información Geográfica Ilwis 3.0 y la edición cartográfica se trabajó en *Arc View* 3.1.

2.2 Trabajo en Campo (segunda etapa)

2.2.1 Recorrido de las áreas de estudio

Se hizo un recorrido de reconocimiento, previo al muestreo, en las áreas de estudio para planear el orden cronológico de las actividades a seguir y examinar visualmente las características que predominan en ellas (Figura 2.1). Se seleccionaron los sitios con base en la extensión de las superficies quemadas y no-quemadas, que pertenecieran al mismo tipo de suelo, que estuvieran dentro de un tipo de relieve que permitiera el muestreo en tres partes del terreno tales como el cauce, el dorso de ladera y la superficie cumbral. Se realizó un croquis del terreno donde se delimitaron los diferentes sitios de muestreo.



Figura 2.1. Recorrido de las áreas afectadas por los incendios forestales de tipo superficial en la región de El Pelado, Tlalpan.

2.2.2 Muestreo de suelos

La época del muestreo de suelos para este caso de estudio fue en marzo de 2003 cuando ocurrieron grandes incendios de origen antrópico y de tipo superficial. El muestreo fue realizado 10 días después con el propósito de que los suelos de las áreas incendiadas no fueran modificados por fenómenos atmosféricos.

Se diseñó un muestreo de tipo dirigido a las áreas no-quemadas con el propósito de evaluar sus propiedades y a las quemadas para diferenciarlas con respecto a las no-quemadas y se dividió en tres porciones de relieve que fueron cauce, dorso de ladera y superficie cumbral (Figura 2.2). Los suelos no-quemados y quemados fueron localizados en la misma unidad cartográfica, tomada para el área de La Malinche de Werner (1974/76) y para el área de El Pelado de CETENAL (1979). De esta manera se aseguró que las formas del relieve estuvieran asociadas a una misma unidad de suelos, es decir, se mantuvieran constantes las condiciones genéticas en los tres tipos de relieve y de suelos, presentando únicamente la diferencia referida entre los sitios no-quemados y quemados.



Figura 2.2. Orientación de los sitios de muestreo de acuerdo a su disposición en el terreno, en el área de La Malinche.

El mayor problema durante el muestreo fue que las áreas no abarcaron las mismas superficies no-quemadas y quemadas dentro de las microcuencas. De acuerdo con los guardabosques de estas áreas (comunicación personal) el hombre quema el pasto con antorchas sobre las veredas o líneas corta fuego (Figura 2.3), razón por la cual los vientos de manera ascendente desplazan las llamas por las cañadas dejando marcadas las fronteras de los incendios forestales. Por lo que los suelos de las áreas no-quemadas se consideraron como un punto de referencia de la unidad edáfica en las mismas condiciones de relieve. De esta forma, estos suelos estuvieron sujetos a cambios menores en la distribución de sus propiedades físicas y químicas con relación a los suelos quemados. El muestreo en suelos no-quemados contó con una unidad de muestreo y dos transectos, mientras que en los suelos quemados se determinaron tres unidades de muestreo y tres transectos. El espaciamiento de los transectos fue de 15 m para los sitios quemados y un espaciamiento de 10 m en los no-quemados (Figura 2.3).

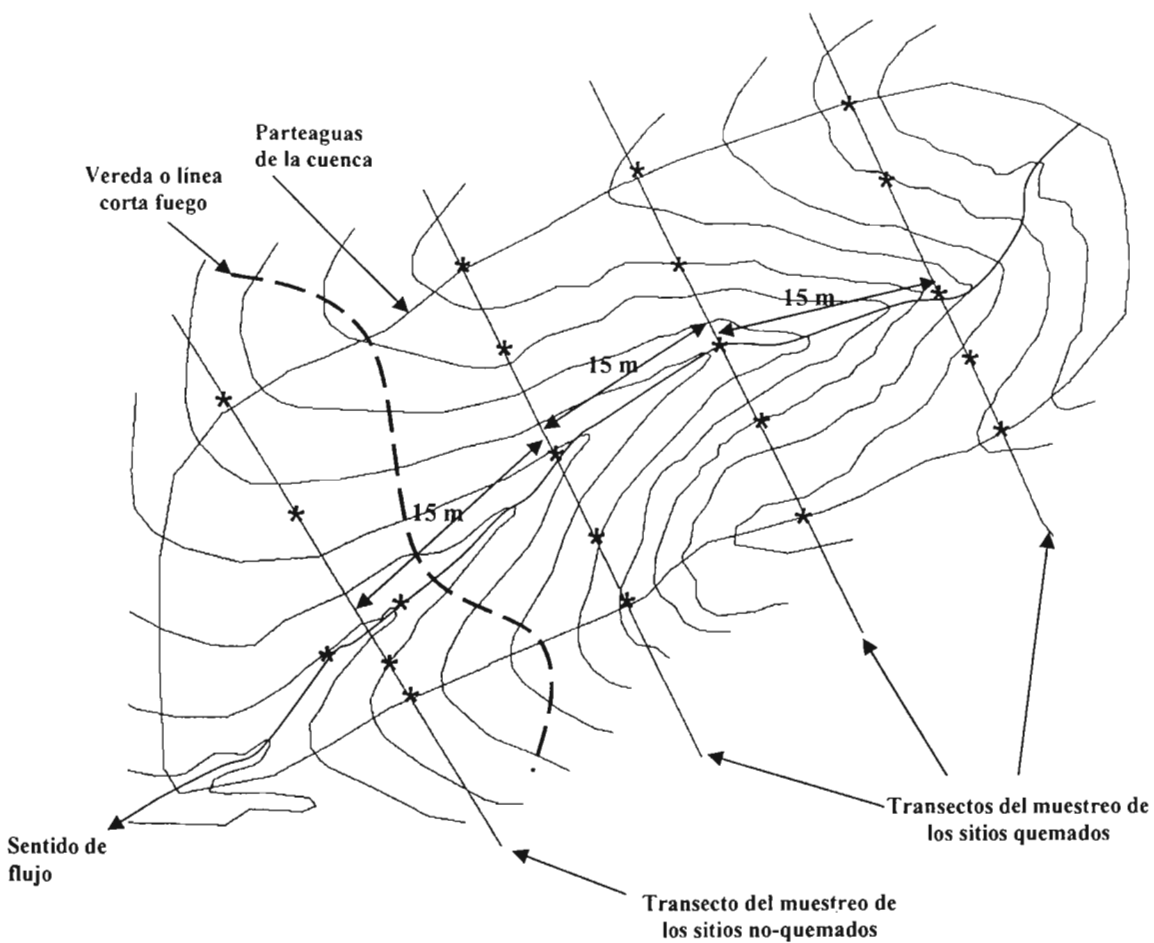


Figura 2.3. Transectos y sitios de muestreo (no-quemados y quemados).

2.2.3 Recolección de muestras para los análisis químicos

La profundidad de la toma de muestras del suelo se realizó con base en el método propuesto por García-Quiroz (2003) y Marafa y Chau (1999), quienes mencionan que en un incendio forestal las propiedades químicas son modificadas en los primeros 10 cm de la superficie. Para homogeneizar la profundidad superficial se abarcaron tanto en los sitios quemados y sin alteración los 8 primeros centímetros, diferenciando una primer muestra hasta los 3 cm y una segunda de los 3 a los 8 cm. Esto se realizó en pozos de 40 cm de ancho y entre 10 y 20 cm de profundidad dependiendo el sitio de muestreo, dejando descubierta una cara para la recolección de la muestra (Figura 2.4 A y B).



Figura 2.4. Recolección (A) y profundidad (B) del muestreo en las áreas quemadas.

Posteriormente se procedía a limpiar la parte superficial del perfil del exceso de materia orgánica y otros productos forestales, cuando se recolectaba la muestra (1 kg aprox.) en bolsas de plástico se depositaban con su etiqueta para su posterior análisis en laboratorio. En total se colectaron 42 muestras por área de estudio, dando un total de 84 (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Número de muestras del suelo para los análisis químicos por profundidad y disposición en el terreno.

Disposición en el terreno	Área 1.-La Malinche		Área 2.-El Pelado		Total
	0 - 3 cm. de profundidad	3 - 8 cm. de profundidad	0 - 3 cm. de profundidad	3 - 8 cm. de profundidad	
CQ	3	3	3	3	12
CNOQ	2	2	2	2	8
LQ	6	6	6	6	24
LNOQ	2	2	2	2	8
SCQ	6	6	6	6	24
SCNOQ	2	2	2	2	8
Total	21	21	21	21	84

(**CQ**) Cauce Quemado, (**CNOQ**) Cauce No-Quemado, (**LQ**) Dorso de Ladera Quemada, (**LNOQ**) Dorso de Ladera No-Quemada, (**SCQ**) Superficie Cumbral Quemada, (**SCNOQ**) Superficie Cumbral No-Quemada.

2.2.4 Recolección de muestras para los análisis físicos

A diferencia del muestreo para las variables químicas, se trabajó con un criterio representativo del espesor superficial por área de estudio, con un total de doce muestras (Tabla 2.2). Esto de acuerdo con Rodríguez (1996) en el cual menciona que el fuego de baja magnitud (250°C) afecta de manera directa los primeros 2.5 cm de profundidad del suelo y de alta magnitud (700°C) afecta hasta los cinco centímetros. Por su parte DeBano (1991), menciona que las propiedades cerca de la superficie del suelo son más probables para ser modificadas por estar expuestas a la superficie de calentamiento

El objetivo del muestreo fue el tener muestras inalteradas para no dañar la estructura del suelo durante la recolección y el transporte. Se realizó con la ayuda de tubos de PVC de 20 cm de longitud con los que se cuantificó la estabilidad de agregados de 250 g de suelo aproximadamente (Figura 2.5A) y un cilindro de volumen conocido (89.31 cm³) para medir la densidad aparente (Figura 2.5B). Los tubos eran presionados hasta que el suelo ocupara por completo su interior y al retirar se cubrían con papel aluminio para que no perdieran humedad.



Figura 2.5. Toma de muestras para los análisis de agregados (A) y densidad aparente (B).

2.3 Trabajo en laboratorio (tercera etapa)

Las muestras de suelos fueron transportadas a los laboratorios de Edafología de la UAM-X y del Instituto de Geología de la UNAM, donde se realizaron los análisis físicos y químicos correspondientes.

Tabla 2.2. Número de muestras para los análisis físicos por disposición en el terreno.

Disposición en el terreno	Área 1.-Malinche	Área 2.-El Pelado	Total
CQ	2	2	4
CNOQ	2	2	4
LQ	2	2	4
LNOQ	2	2	4
SCQ	2	2	4
SCNOQ	2	2	4
Total	12	12	24

(CQ) Cauce Quemado, (CNOQ) Cauce No-Quemado, (LQ) Dorso de Ladera Quemada, (LNOQ) Dorso de Ladera No-Quemada, (SCQ) Superficie Cumbral Quemada, (SCNOQ) Superficie Cumbral No-Quemada.

Las muestras fueron desempacadas y secadas a temperatura ambiente en el laboratorio, por un periodo de 48 horas y en algunos casos fue necesario más tiempo, durante este periodo los terrones del suelo fueron disgregados. Los suelos secos fueron molidos en un mortero de porcelana y tamizados con una malla del número 10, el cual equivale a 2 mm de diámetro. Al final de este proceso, el total de la muestra que pasó a través de esta malla se depositaba nuevamente en bolsas de plástico y fueron pesadas para conocer el material rocoso que no pudo molerse. Las muestras tamizadas fueron determinadas por las siguientes técnicas y los procedimientos que son descritos en el Anexo 1.

2.3.1 Técnicas de análisis para las propiedades físicas y químicas

Color (*Munsell Soil Chart*, 1994)

Textura (*Método del hidrómetro de Bouyoucos*, 1962) (Figura 2.6)

Densidad aparente (*Método del cilindro*; Herre, 2000)

Humedad del suelo (*Método gravimétrico*; Baver *et al.*, 1980)

Densidad real (*Método del picnómetro*; ASTM, 1958)

Porosidad (relación entre D_a y D_r ; Baver *et al.*, 1980)

Estabilidad de agregados (*Método Yoder*, 1936)

pH (*Método del potenciómetro con electrodo de vidrio*)

Materia orgánica (*Método de Walkley y Black*, 1947)

Capacidad de intercambio Catiónico (*Método de percolación con acetato de amonio 1Na pH7; Jackson, 1976*)

Calcio y Magnesio (*Método por Volumetría con EDTA; Jackson, 1976*)

Potasio y Sodio (*Método por Flamometría; Peech, 1947*)

Fósforo (*Método del Colorímetro; Bray y Kurtz, 1945*)

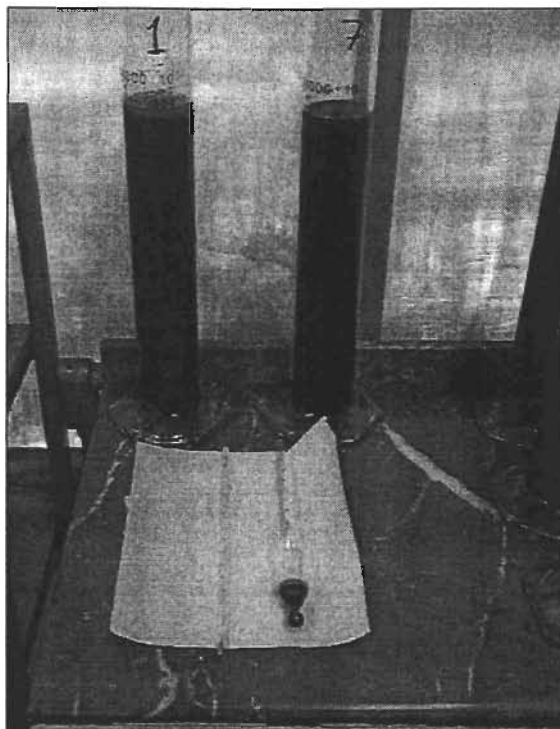


Figura 2.6. Trabajo de laboratorio para la determinación de textura por el hidrómetro de Bouyoucos.

2.4 Análisis estadísticos (cuarta etapa)

2.4.1 Análisis de varianza (ANDEVA).

El análisis de varianza, fue utilizado para comparar la representatividad de las propiedades químicas entre las dos profundidades de los suelos quemados. Se realizó la prueba de la razón F (Spiegel, 1991) con un nivel de significancia del 99%.

2.4.2 Análisis multivariado de agrupamiento (Cluster).

Cuando se tienen conjuntos de datos que constan de una gran cantidad de variables, los cuales resumen amplias cantidades de datos por medio de parámetros mínimos, la importancia y utilidad es mayor cuando el número de variables se incrementan. La

simplificación, es el objetivo principal de los métodos multivariados (Johnson, 1998), razón por la cual estos métodos fueron aplicados en este trabajo de investigación, debido a las probables relaciones que existen entre las variables físicas y químicas, de los suelos no quemados y quemados.

El objetivo del *cluster* o agrupamiento, como herramienta estadística es describir un grupo de elementos que son más similares entre ellos que con respecto a los elementos fuera del grupo. Los elementos son agrupados y basados en su similitud, esta asume que la proximidad de los puntos en n-espacios refleja la similitud de sus propiedades y con esta finalidad se aplicó en este caso (Johnson, 1998).

Este método multivariado se aplicó con la ayuda del paquete estadístico STATISTICA (2001), a los valores de los datos obtenidos de los análisis físicos y químicos. En cuatro matrices de datos fueron colocados los valores por separado, de acuerdo con las áreas de estudio y con sus tratamientos (no-quemado y quemado), las columnas se identificaron por el nombre de las variables de los análisis físicos y químicos, y en las filas los casos que corresponden a las claves utilizadas para la descripción del tipo de relieve y de la profundidad. En las series de datos se tomaron en cuenta las variables físicas y químicas, en donde el valor de cada variable fue la media aritmética. El siguiente paso fue estandarizar los datos con el propósito de que todas las variables tuvieran las mismas unidades numéricas. A partir de la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{X - \bar{X}}{S}$$

Donde X es el valor del dato de cada unidad, $\bar{X}$ es la media de los datos, S es la desviación estándar y Z es el valor de las unidades estandarizadas (Freund, 2004). Para este trabajo se utilizó el método de clasificación que conjunta grupos por disimilitudes de manera jerárquica a través del método de la distancia euclidiana estándar, usando los valores Z estandarizados. A partir de la siguiente ecuación:

$$d_{rs} = ((Z_r - Z_s) (Z_r - Z_s))^{1/2}$$

Donde Z_r es el vector de los valores de Z , correspondientes a la r -ésima unidad experimental. Los resultados se presentaron en forma de dendrograma, el cual contiene ramas que unen datos y muestra el orden que se asignan los puntos a los agrupamientos y donde las longitudes de sus ramas son proporcionales a las distancias entre los puntos y agrupamientos, cuando los puntos y los agrupamientos se combinan (Johnson, 1998).

Capítulo 3

Resultados y discusión

3.1 Características físicas y químicas de los suelos en La Malinche.

Textura

Las clases texturales dominantes fueron, en cauce y superficie cumbre, el franco arenoso y en el dorso de ladera, la arena franca, esto concuerda con Young (1991) quien menciona que por lo regular los suelos forestales presentan generalmente textura arenosa. En las áreas quemadas el porcentaje de las diferentes partículas, por tamaño, presentó diferencias mínimas, sin llegar a modificarse la clase textural.

Densidad aparente y real

En la superficie, la densidad aparente de los sitios sin alteración mostró que los suelos de los dorsos de ladera son más densos con un promedio de 0.83 g/cm^3 respecto a los suelos de los cauces 0.78 g/cm^3 y las superficies cumbrales 0.67 g/cm^3 , mismos que coinciden con la densidad aparente de los horizontes orgánicos (Aguilera y Martínez, 1980). Ahora bien, los sitios quemados presentaron diferencias, ya que los valores fueron mayores por 0.15 g/cm^3 en el cauce y en la superficie cumbre 0.16 g/cm^3 . Mientras que el dorso de ladera fue menor por 0.9 g/cm^3 con respecto a los no-quemados mostrados en la Figura 3.1.

Los valores de densidad real fueron constantes, el menor 1.63 g/cm^3 en cauce, 1.64 g/cm^3 en la superficie cumbre y el mayor 1.69 g/cm^3 en el dorso de ladera (Figura 3.1). Ahora bien, cuando se quemaron estos suelos ocurrieron procesos que modificaron esta variable, de acuerdo con Baver *et al.* (1980) la densidad real depende de la constitución química, mineralógica y el grado de hidratación, por lo que al alterarse el suelo por el fuego, estas características propiciaron que la densidad real fuera menor siendo más afectado el cauce con 0.49 g/cm^3 , después el dorso de ladera 0.25 g/cm^3 y por último la superficie cumbre 0.10 g/cm^3 , esto a causa de las temperaturas alcanzadas durante el proceso de combustión en este tipo de relieve.

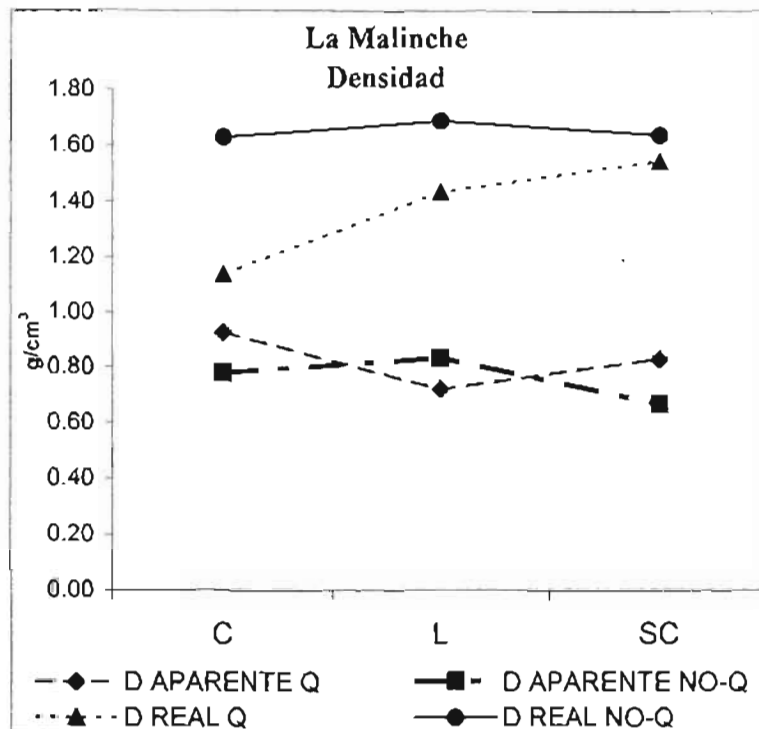


Figura 3.1. Gráfica de las variables densidad aparente y densidad real con sus dos tratamientos, quemado (Q) y no-quemado (NOQ).

Porosidad

Los suelos sin alteración, presentaron altos porcentajes de porosidad, el menor valor fue de 50.52% en cauce y el mayor valor fue de 57.55% en superficie cumbral, lo que muestra una relativa homogeneidad en los tres tipos de relieve. Esto con relación a la clase textural de los sitios muestreados, donde predominaron los arenosos, pues como se ha mencionado las arenas forman en el suelo poros grandes (Young, 1991).

Los resultados en los sitios quemados, indican que tuvieron menor espacio poroso, ya que quizás fueron ocupados por partículas de menor tamaño al disgregarse el suelo (Figura 3.2). Siendo el cauce, el relieve más afectado, con la mayor diferencia de 34.35%, posteriormente la superficie cumbral con 11.38%, y el dorso de ladera con 0.72%.

Humedad

Los porcentajes de humedad del suelo sin alteración fueron similares entre ellos, de 33.41% en el dorso de ladera a 38.88% en la superficie cumbral; mostrando estabilidad entre los tres tipos de relieve. Entre tanto, los suelos quemados del cauce y de la superficie cumbral tuvieron menores

porcentajes, con diferencia de 9.37 y 2.86% respectivamente. Sin embargo, en el dorso de ladera (Figura 3.2), existió mayor humedad con un valor de 9.67% con respecto a los sitios no-quemados.

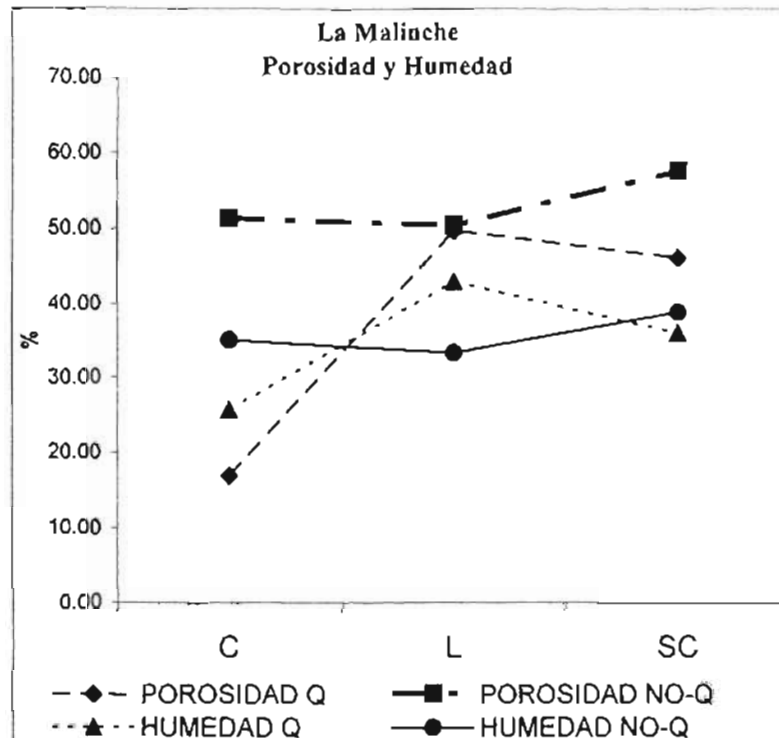


Figura 3.2. Gráfica de las variables porosidad y humedad con sus dos tratamientos, quemado (Q) y no-quemado (NOQ), expresadas en porcentajes.

Agregados del suelo

Los sitios no-quemados muestran que los agregados >4.75 mm en la superficie cumbre y de 2.00-4.75 mm de diámetro en el dorso de ladera (Tabla 3.1), tienen el mayor porcentaje de agregación con un rango entre 5 y 17%, mientras que para los micro-agregados entre 1.00-2.00 mm de diámetro y menores fueron más uniformes y con un intervalo entre 2 y 5% de agregación.

La estabilidad de los agregados del suelo presentó diferencias después de los incendios forestales, en los agregados del cauce y del dorso de ladera tuvieron un decrecimiento en el porcentaje de todos los tamaños de agregados. Esta disminución se puede deber a la calcinación que sufrió la materia orgánica que mantenía la agregación, reduciendo de tamaño a los agregados.

Los resultados muestran que estos dos tipos de relieve son más inestables por la magnitud del fuego pues al quemarse la materia orgánica provocó decrecimiento en el espesor de humus del suelo, mientras que en la superficie cumbra el proceso fue inverso, debido a que los agregados tuvieron mayor porcentaje en los sitios quemados, donde el fuego presentó menor magnitud, generando mayor cantidad de micro-agregados. Esto concuerda con los trabajos aportados por Andreu *et al.* (2001) y Ternan y Neller (1999), en los que mencionan que el efecto degradativo del calentamiento durante un incendio forestal ocasiona el incremento de agregados de diámetros más pequeños.

Tabla 3.1. Datos de estabilidad de agregados en La Malinche.

Agregados	Tratamiento		Diferencia %
	No-Quemado (%)	Quemado(%)	
>4.75 mm			
C	3.09	1.06	-2.03
L	5.97	5.08	-0.89
SC	13.73	17.10	3.37
2.00-4.75 mm			
C	9.89	5.77	-4.12
L	9.93	9.36	-0.57
SC	10.79	12.16	1.37
1.00-2.00 mm			
C	4.17	3.43	-0.74
L	4.58	3.12	-1.46
SC	3.19	3.38	0.19
0.50-1.00 mm			
C	4.68	3.46	-1.22
L	3.98	3.25	-0.73
SC	2.80	2.94	0.14
0.25-0.50 mm			
C	3.53	2.59	-0.94
L	2.53	2.09	-0.44
SC	1.90	2.41	-0.51

C=cauce, L=dorso de ladera, SC=superficie cumbra.

pH

El pH de los suelos no-quemados fue ligeramente ácido en las dos profundidades y en los tres tipos de relieve de acuerdo con la escala de intervalos de pH de Donahue *et al.* (1988) (Tabla 3.2). En los suelos quemados el pH tendió a ser mayor pues fue de ligeramente a muy poco ácido,

en las tres porciones de ladera. Esto concuerda con lo reportado por Jalaluddin (1969), ya que en su estudio los valores de pH aumentaron después de un incendio, de igual forma se incrementó en La Malinche, en los sitios quemados, lo cual puede deberse a la liberación de las bases de Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ y Na^+ en las cenizas (Donahue *et al.*, 1988).

Materia orgánica

El contenido de materia orgánica de los suelos no-quemados, se clasificó de acuerdo con Fassbender y Bornemisza (1994) (Tabla 3.2). Los suelos del cauce y de la superficie cumbral a las dos profundidades y el dorso de ladera de 0-3 cm fueron clasificados con muy altos porcentajes, pero el dorso de ladera de 3-8 cm fue clasificado con alto porcentaje de materia orgánica.

Los suelos quemados presentaron mayores porcentajes de materia orgánica, la mayor magnitud y tiempo de incidencia del proceso de combustión que ejercieron las temperaturas sobre el piso forestal justifican que los resultados tuvieran mayores contenidos de materia orgánica, en los tres tipos de relieve, ya que como se ha mencionado, el fuego agiliza parte del proceso de mineralización y con esto provee valores más altos de porcentaje.

Sin embargo, en la superficie cumbral de 0-3 cm de profundidad el porcentaje fue menor, aunque siguió clasificado como muy alto. La razón principal de que esta porción de ladera tuviera menor porcentaje se debió a que el fuego presentó menor magnitud y tiempo, pues fue desplazado por el viento con alta velocidad de propagación, mientras que en los otros dos tipos de relieve fue retenido más tiempo propiciando alta magnitud (Burton *et al.*, 1978) de temperaturas durante el incendio.

Capacidad de intercambio catiónico

Los suelos no-quemados de 0-3 cm de profundidad en la superficie cumbral tuvieron una mayor capacidad de intercambio catiónico que el cauce y el dorso de ladera, pues en estos dos es mayor la capacidad de intercambio catiónico a la profundidad de 3-8 cm. Los valores de CIC tuvieron diferencias en las áreas quemadas.

Tabla 3.2. Resultados de las variables químicas de los suelos en el área de La Malinche.

Variables	Tratamiento			Diferencia
		No-Quemado	Quemado	
pH	C 0-3	6.17 ± 0.05	6.54 ± 0.28 a	0.37
	C 3-8	6.11 ± 0.01	6.45 ± 0.19 a	0.34
	L 0-3	6.35 ± 0.08	6.77 ± 0.60 a	0.42
	L 3-8	6.30 ± 0.00	6.50 ± 0.39 a	0.20
	SC 0-3	6.01 ± 0.26	6.67 ± 0.45 a	0.66
	SC 3-8	5.89 ± 0.31	6.36 ± 0.31 a	0.47
MO %	C 0-3	11.81 ± 1.5	15.95 ± 0.5 a	4.14
	C 3-8	10.33 ± 1.8	10.47 ± 0.5 b	0.14
	L 0-3	7.52 ± 2.0	11.35 ± 3.1 a	3.83
	L 3-8	5.29 ± 1.8	8.79 ± 3.3 b	3.5
	SC 0-3	13.12 ± 3.2	11.15 ± 0.8 a	-1.97
	SC 3-8	7.11 ± 1.3	8.38 ± 1.5 b	1.27
C %	C 0-3	6.85 ± 0.9	9.25 ± 0.3 a	2.4
	C 3-8	5.99 ± 1.0	6.07 ± 0.3 b	0.08
	L 0-3	4.36 ± 1.1	6.58 ± 1.8 a	2.22
	L 3-8	3.07 ± 1.0	5.09 ± 1.9 b	2.02
	SC 0-3	7.61 ± 1.8	6.46 ± 0.4 a	-1.15
	SC 3-8	4.12 ± 0.7	4.86 ± 0.9 b	0.74
CIC meq/100g	C 0-3	23.24 ± 1.0	43.99 ± 0.8 a	20.75
	C 3-8	33.00 ± 0.0	23.97 ± 1.5 b	-9.03
	L 0-3	21.74 ± 1.0	38.15 ± 11.5 a	16.41
	L 3-8	26.24 ± 1.0	27.87 ± 2.9 b	1.63
	SC 0-3	29.24 ± 1.0	28.11 ± 5.1 a	-1.13
	SC 3-8	23.24 ± 1.0	18.75 ± 3.3 b	-4.49
Ca ⁺⁺	C 0-3	38.50 ± 0.7	59.28 ± 3.2 a	20.78
	C 3-8	40.99 ± 1.4	41.65 ± 1.5 b	0.66
	L 0-3	36.99 ± 1.4	73.95 ± 2.9 a	36.96
	L 3-8	33.76 ± 5.6	47.29 ± 2.1 b	13.53
	SC 0-3	30.98 ± 1.4	49.10 ± 2.7 a	18.12
	SC 3-8	35.47 ± 2.1	39.04 ± 6.5 b	3.57
Mg ⁺⁺	C 0-3	36.97 ± 2.1	45.16 ± 0.7 a	8.19
	C 3-8	43.63 ± 4.6	33.79 ± 2.0 b	-9.84
	L 0-3	38.00 ± 0.0	35.68 ± 3.6 a	-2.32
	L 3-8	36.47 ± 2.1	42.05 ± 1.8 b	5.58
	SC 0-3	15.93 ± 2.1	46.85 ± 2.7 a	30.92
	SC 3-8	35.50 ± 0.7	32.29 ± 1.9 b	-3.21
K ⁺	C 0-3	0.71 ± 0.06	1.08 ± 0.14 a	0.36
	C 3-8	0.52 ± 0.02	0.53 ± 0.15 b	0.01
	L 0-3	0.64 ± 0.21	1.13 ± 0.45 a	0.48
	L 3-8	0.34 ± 0.04	0.77 ± 0.13 b	0.44
	SC 0-3	0.74 ± 0.10	1.10 ± 0.18 a	0.37
	SC 3-8	0.46 ± 0.11	0.51 ± 0.07 b	0.05
Na ⁺	C 0-3	1.30 ± 0.00	1.61 ± 0.45 a	0.31
	C 3-8	0.97 ± 0.06	1.01 ± 0.08 b	0.03
	L 0-3	1.41 ± 0.17	1.87 ± 0.56 a	0.45
	L 3-8	0.66 ± 0.33	1.22 ± 0.37 b	0.56
	SC 0-3	1.33 ± 0.28	1.69 ± 0.25 a	0.36
	SC 3-8	1.26 ± 0.28	0.94 ± 0.20 b	-0.32

MO=materia orgánica, C=carbón orgánico, CIC=capacidad de intercambio catiónico, pH=potencial de hidrógeno, Ca=calcio, Mg=magnesio, K=potasio, Na=sodio. C=cauce, L=dorso de ladera, SC=superficie cumbral. En la columna 3 y 4 (Media ± D.S.). Letras diferentes (a y b) entre las profundidades de la misma porción de ladera muestran diferencias significativas ($P<0.01$)

De acuerdo con Sacchi y De Pauli (2002), en las profundidades, tanto de 0-3 cm, como de 3-8 cm, deben presentar una menor cantidad de intercambio en un suelo modificado, con relación a uno en estado natural. Sin embargo, en estos suelos ocurrió de diferente manera, en el cauce y el dorso de ladera aumentaron 20.75 y en la profundidad superficial 16.41 meq/100 g, y en la superficie cumbral fue menor 1.13 meq/100 g, mientras que en la profundidad de 3-8 cm los valores del cauce y la superficie cumbral fueron menores y en el dorso de ladera mayores.

Calcio y magnesio

La Tabla 3.2 muestra que en los suelos no-quemados los nutrientes Ca^{++} y Mg^{++} presentan en la profundidad superficial valores de entre 30 y 38 Cmol kg^{-1} con excepción del Mg^{++} en la superficie cumbral que fue de 15.93 Cmol kg^{-1} . Sin embargo, en la profundidad subsuperficial existieron valores mayores en el cauce y la superficie cumbral, con relación al superficial. Mientras que en el dorso de ladera la diferencia fue menor.

En lo que respecta a suelos quemados el contenido de Ca^{++} y Mg^{++} en las profundidades superficiales fueron mayores que las subsuperficiales con diferencias de 10 a 35 Cmol kg^{-1} , siendo mayores en el cauce y el dorso de ladera. Cuando ocurren los incendios forestales en la materia orgánica se produce un proceso de oxidación, mismo que libera un alto porcentaje de Ca^{++} y Mg^{++} , dejando disponibles estos nutrientes en los dos horizontes.

Prácticamente en todos los sitios de muestreo los valores de Ca^{++} y Mg^{++} fueron mayores en sitios quemados, pero éste fue aún mayor en los cauces y en las laderas y en menor grado en la superficie cumbral. Comparativamente después del incendio forestal, a la profundidad de 0-3 cm, prácticamente en todos los tipos de relieve se halló mayor concentración de estos nutrientes. Mientras que el Mg^{++} a la profundidad de 3-8 cm, en el cauce y la superficie cumbral se halló menor concentración con respecto al no-quemado y el dorso de ladera aumentó significativamente, pues quizá en este tipo de relieve la temperatura de combustión fue mayor.

Sodio y potasio

Los valores de concentración de K^+ y Na^+ en suelos no-quemados, determinan que es muy activa la capa orgánica del suelo, ya que a la profundidad superficial en los tres tipos de relieve, se

presentan valores de K^+ de 0.64 a 0.74 $Cmol\ kg^{-1}$ y de Na^+ 1.30 a 1.41 $Cmol\ kg^{-1}$, mayores que de las profundidades subsuperficiales (Tabla 3.2). Por su parte, en los suelos quemados se aceleró el proceso de mineralización antes mencionado y generó mayor disponibilidad de estos nutrimentos.

Fósforo

Los valores de fósforo disponible que presentaron los suelos no-quemados fueron disminuyendo con la pendiente en el cauce 8.0 ppm, el dorso de ladera 11.5 ppm y la superficie cumbral 11.8 ppm (Figura 3.3). Este nutrimento mostró diferencias considerables, entre sitios no-quemados y quemados, tendiendo a disminuir en los quemados.

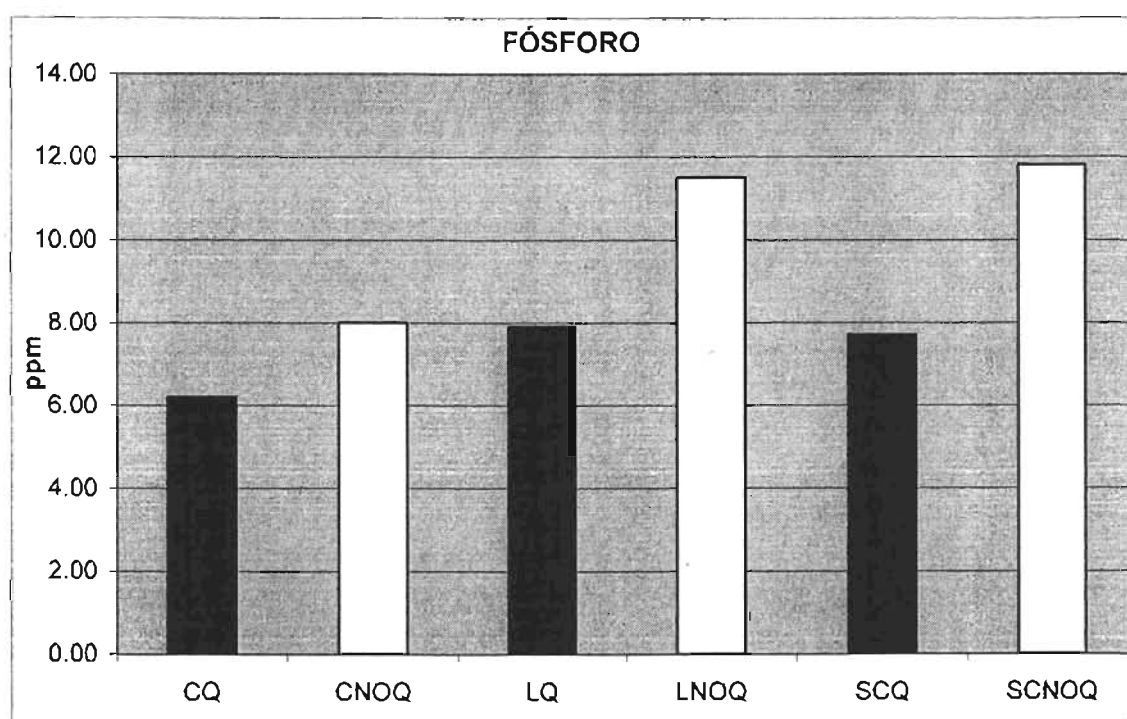


Figura 3.3. Valores de concentración de fósforo disponible en suelos quemados (Q) y no-quemados (NOQ), para una sola profundidad (0-3 cm), en la Malinche.

Las temperaturas que se alcanzan durante la quema favorecen la pérdida de los elementos minerales por volatilización (Fassbender y Bornemisza, 1994). El nitrógeno y el fósforo son los elementos más proclives a perderse dado que tienen las temperaturas de volatilización más bajas 200 y 360°C respectivamente (Maass y Jaramillo, 1999). Mientras que Alauzis *et al.* (2004), mencionan que nutrimentos como Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ y Na^+ , son volatilizados a temperaturas que van de 740 a los 1,240°C.

3.2 Análisis multivariado de agrupamiento (*Cluster*), en La Malinche.

Suelo No-quemado

Los resultados del agrupamiento estadístico *cluster* para las propiedades físicas y químicas dividieron las variables en tres grupos. En el dendrograma de la Figura 3.4, el primer grupo a discutir (Grupo 1) enmarca a la materia orgánica con el carbón orgánico, que son variables asociadas, dado que la materia orgánica contiene en promedio 58% de carbón orgánico (Fassbender y Bornemisza, 1994). Posteriormente, el potasio y el sodio intercambiables se relacionan estrechamente, particularmente el Na^+ , el cual es considerado como un parcial sustituto del K^+ en la micela del suelo y la concentración de ambos iones tienen un comportamiento similar en los suelos (Navarro y Navarro, 2000). La agrupación del K^+ y el Na^+ con la materia orgánica es quizá relacionada con que al descomponerse esta última, es una fuente de nutrimentos como de iones intercambiables de K^+ y Na^+ para la vegetación del sitio. Por otra parte, la relación que existe entre el porcentaje de las arenas y la densidad real es que están influenciadas por la mineralogía y por lo regular los suelos forestales presentan generalmente textura arenosa (Young, 1991). Las arenas son las partículas de mayor tamaño, las cuales permiten que se estructuren poros grandes, mismos que coinciden con la materia orgánica, ya que al presentar los suelos de esta área un alto porcentaje de materia orgánica (>4%) favorece la porosidad y presenta baja densidad real en la superficie del suelo.

El segundo grupo determina una estrecha relación entre los limos y la humedad con los agregados de 2.00-4.75 mm de diámetro, esto se debe a que este tamaño de agregados retiene agua y favorece la estructuración, como lo menciona Foth (1996), cuando existe agua, hidrata las partículas coloidales y al perderse y deshidratarse la materia coloidal las partículas se pegan o cementan formando un agregado. Después, las variables porosidad y agregados de >4.75 mm de diámetro, se relacionan debido a que los poros están influenciados por la estructura del suelo, ya que los agregados forman uniones dejando huecos en el suelo, es por ello que entre mayor sea el tamaño de los agregados (en este caso >4.75 mm) mayor es la relación con la porosidad (Buol *et al.*, 1988).

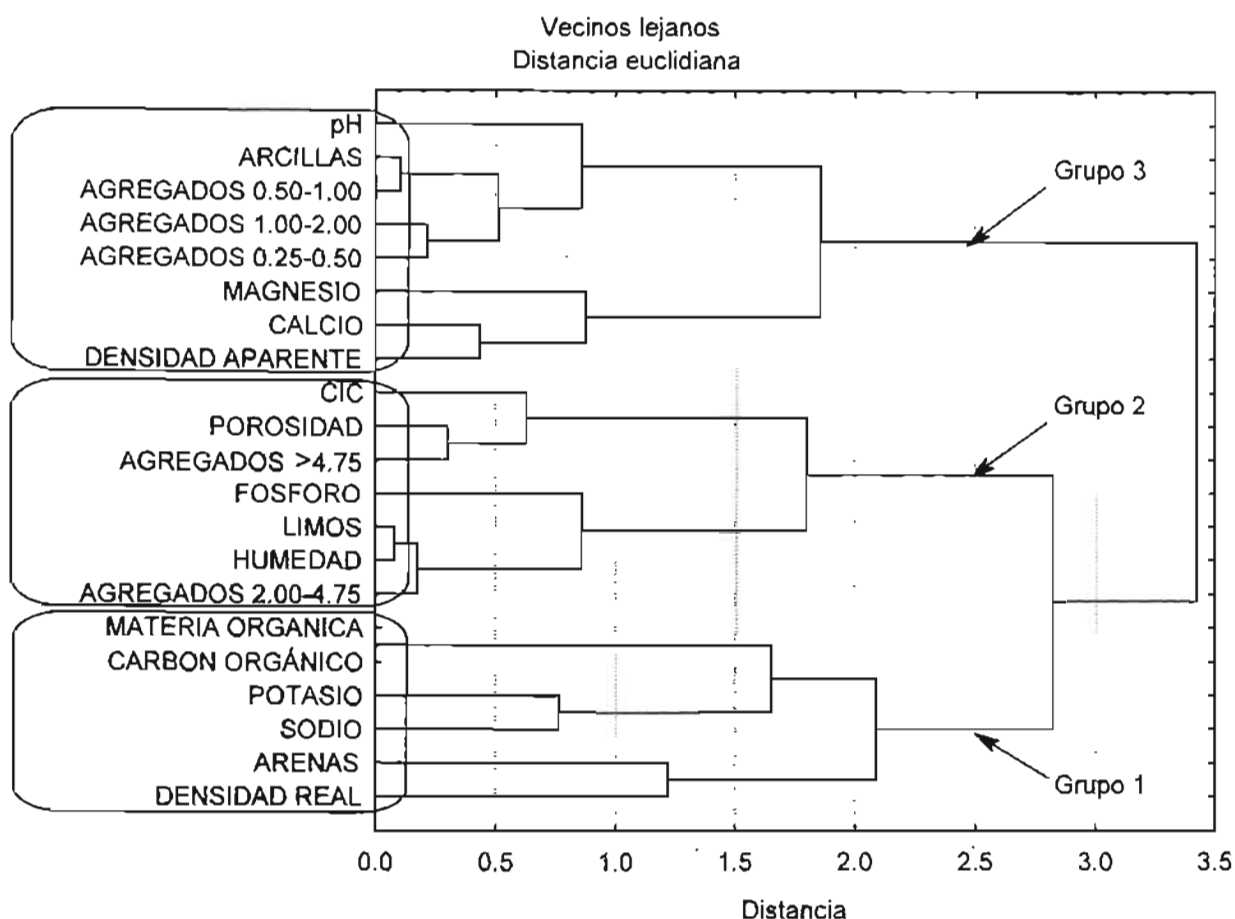


Figura 3.4. Dendrograma. Parque Nacional La Malinche, suelo no-quemado.

El tercer grupo, conjunta a las arcillas con los micro-agregados (menores de 2.00 mm de diámetro). Esto está determinado por el contenido de arcillas, ya que la coherencia de los agregados más estables y pequeños puede estar dada por los fuertes lazos que existen entre sus coloides. El Ca^{++} y el Mg^{++} son nutrimentos que se agrupan porque generalmente se presentan en altas cantidades en los suelos forestales.

Suelo quemado.

Los resultados de las propiedades de los suelos quemados, se presentan en el dendrograma de la Figura 3.5. El primer grupo (Grupo 1) relaciona a las arenas con la humedad, la relación de estas dos variables se debe a que los suelos con alta cantidad de arenas provocan menor retención de humedad, aunado a esto el color de las cenizas propician que existan mayores temperaturas y por lo tanto elevada evaporación con relación a los suelos no-quemados. Posteriormente se agruparon

los agregados de 1.00-2.00 y 0.50-1.00 mm de diámetro, pues ambas variables tienen un porcentaje muy semejante en este suelo forestal.

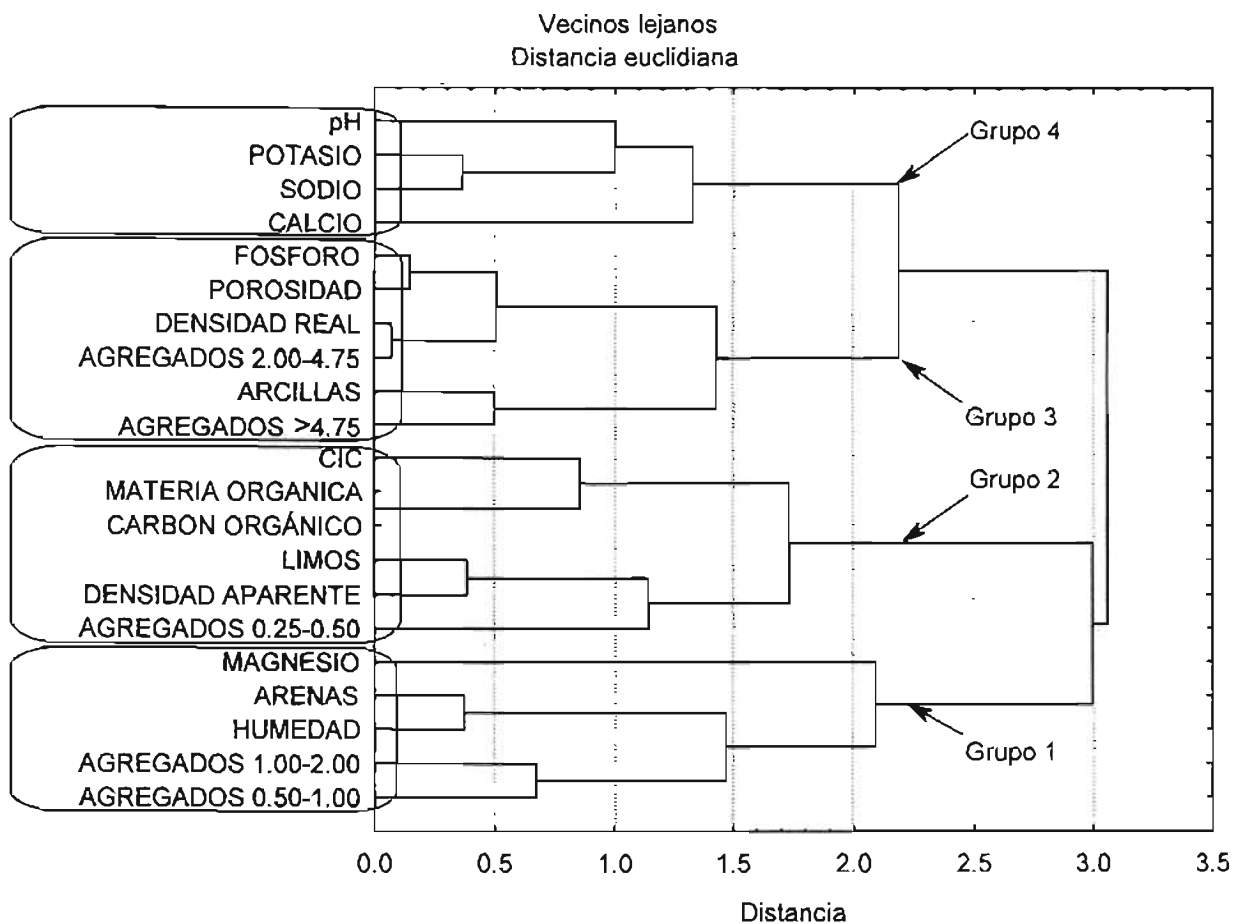


Figura 3.5. Dendrograma. Parque Nacional La Malinche, suelo quemado.

El segundo grupo, conjunta a la materia orgánica y el carbón orgánico, con la CIC. La materia orgánica en un suelo forestal generalmente es alta, por lo tanto, cuando ésta se quema se acelera el proceso de descomposición, resultando la mineralización del suelo, que incrementa la CIC (Fassbender y Bornesmisza, 1994). Por esta razón, la materia orgánica contribuye a dicha capacidad de intercambio en el suelo. Después, se agrupan los limos y la densidad aparente, con los agregados de 0.25-0.50 mm de diámetro. Esto sucede debido a que al quemarse las partículas del suelo se disgregan, dando como resultado un mayor número de los agregados más pequeños (Andreu *et al.*, 2001). Así es posible inferir, que al quemarse la materia orgánica permite la

disgregación de la estructura, obstruyendo los poros naturales del suelo e incrementando la densidad aparente y la compactación de los suelos.

En el tercer grupo, se unen la densidad real y los agregados de 2.00-4.75 mm de diámetro, éstas se vinculan por la relación del espacio ocupado por los agregados en el suelo. Posteriormente, el fósforo con la porosidad Fassbender y Bornesmisza (1994), explican que el contenido total del fósforo depende de la textura de los suelos, ya que cuanto más fino es su textura, mayor es el contenido de P total, la relación más explícita es que el suelo de La Malinche al ser arenoso contiene bajas cantidades de P y cuando sufrió el proceso de combustión la alta porosidad permitió la volatilización de este nutrimento. En el último subgrupo las arcillas se agruparon con los agregados de >4.75 mm de diámetro, estas variables mantienen una estrecha relación, ya que la formación de los agregados depende de algunos factores, entre ellos de la naturaleza del material arcilloso existente en el suelo (Acevedo *et al.*, 2001).

En el cuarto grupo, el pH del suelo quemado aumentó su alcalinidad debido a que a ciertas temperaturas durante el incendio, se acelera el proceso de oxidación (Fassbender y Bornesmisza, 1994). El mismo proceso ocurre con el K^+ y el Na^+ . El potasio, aumenta ya que al quemarse el suelo la acumulación de cenizas conjunta gran cantidad de bases en la solución del suelo y en el complejo coloidal. El K^+ y el Na^+ permanecen fuertemente unidos aun después del incendio.

3.3 Características físicas y químicas de los suelos en El Pelado.

Textura

Las clases texturales dominantes fueron, en el dorso de ladera y la superficie cumbral, el franco arenoso y en el cauce, el franco. El cauce fue el único sitio que difirió de clase textural al pasar a franco arenoso, aunque con una diferencia mínima.

Densidad aparente y real

Los valores de densidad aparente fueron en el cauce y en el dorso de ladera 0.62 g/cm^3 y en la superficie cumbral 0.57 g/cm^3 (Figura 3.6) estos valores están influenciados por la presencia de la materia orgánica en la superficie, considerados como suelos orgánicos por Aguilera y Martínez, (1980) en la Tabla 1.3. Los sitios quemados fueron más densos, producto fundamentalmente de las modificaciones por la combustión ejercida sobre la materia orgánica que contiene el horizonte superficial. Pues fue mayor en los sitios quemados por 0.5 g/cm^3 , en el cauce, 0.8 g/cm^3 , en el dorso de ladera y en la superficie cumbral 0.7 g/cm^3 , aunque siguieron clasificados como orgánicos.

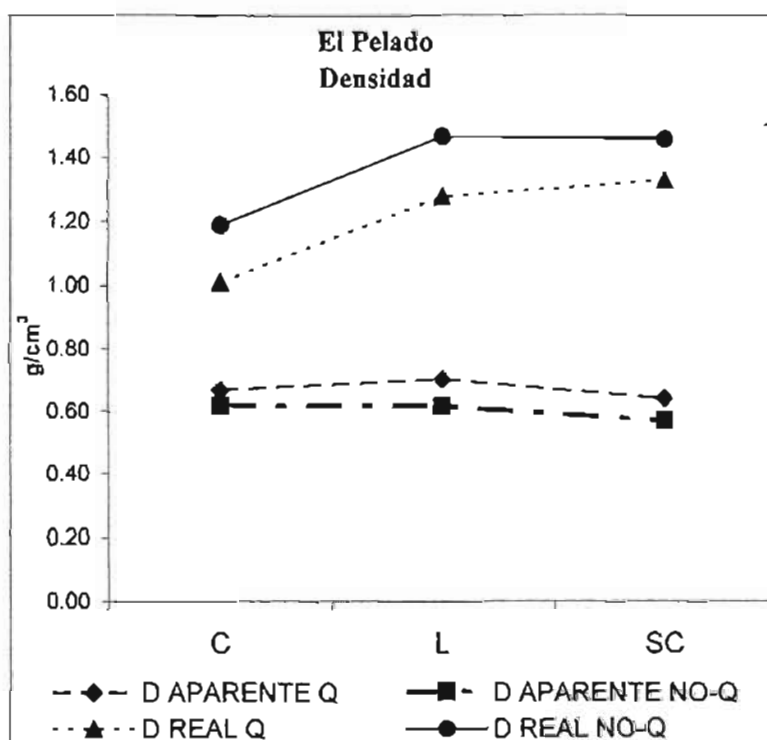


Figura 3.6. Gráfica de las variables densidad aparente y densidad real con sus dos tratamientos, quemado (Q) y no-quemado (NOQ).

La densidad real, presentó los siguientes valores en los suelos no-quemados, cauce 1.19 g/cm³, dorso de ladera 1.47 g/cm³ y superficie cumbral 1.46 g/cm³, mientras que los suelos quemados presentaron diferencias substanciales con menor densidad real. En los tres tipos de relieve la densidad real decreció 0.18 g/cm³, en cauce, 0.19 g/cm³, en dorso de ladera y 0.13 g/cm³, en superficie cumbral, lo cual se puede observar en la Figura 3.6. Esto aparentemente por las temperaturas registradas durante el incendio, mismas que modificaron la constitución química, mineralógica y el grado de hidratación del suelo, provocando que la capa de materia orgánica disminuyera en la superficie del terreno.

Porosidad

En los sitios no-quemados, se presentaron altos porcentajes de porosidad, el valor menor 46.90% fue para el cauce, para el dorso de ladera 57.01% y el mayor 61.40%, en la superficie cumbral. Pasando a los sitios quemados, las diferencias determinan que en todos estos sitios de muestreo fue menor el espacio poroso (Figura 3.7) al ser ocupado por partículas de tamaños inferiores al disgregarse el suelo. Siendo el cauce la porción de ladera con mayor diferencia 16.16%, detrás las superficies cumbrales con 13.4% y por último las laderas con 12.56%.

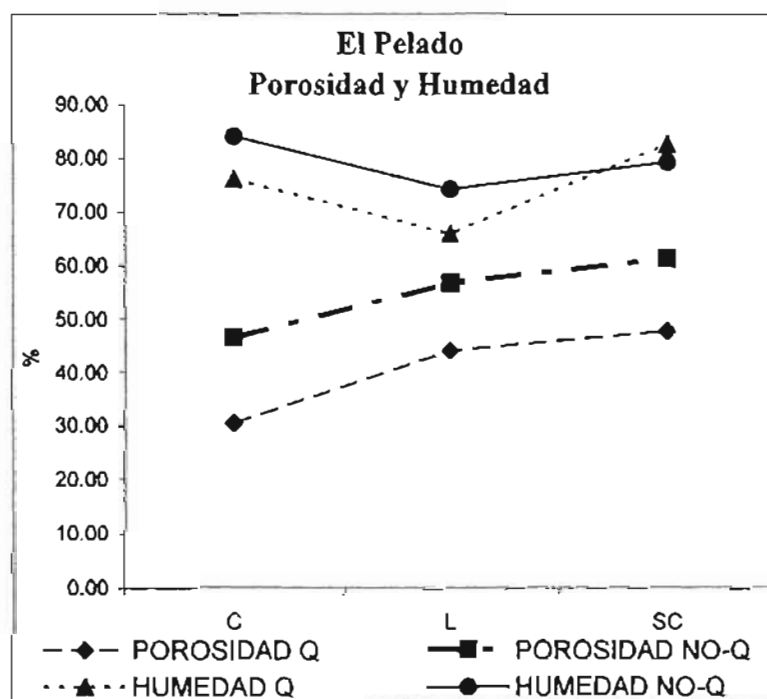


Figura 3.7. Gráfica de las variables porosidad y humedad con sus dos tratamientos, quemado (Q) y no-quemado (NOQ), expresadas en porcentajes.

Humedad

En los suelos no-quemados, los porcentajes de humedad fueron altos, con valores que van de 74.46% en el dorso de ladera y de 84.31% en el cauce estos valores se deben que en la madrugada anterior al día de toma de muestras cayó una lluvia ligera, de acuerdo a los guardabosques del área, por esta razón los valores de humedad fueron altos. Por lo que respecta a los sitios quemados, los valores fueron menores por 8.28% en el dorso de ladera y 8.02% en el cauce. Sin embargo, la superficie cumbral mostró un resultado distinto a lo esperado, 3.32% mayor en los sitios quemados (Figura 3.7).

Agregados del suelo

En esta área, se presentan los siguientes resultados de los suelos sin alteración, los agregados de 2.00-4.75 mm de diámetro tuvieron los mayores porcentajes de agregación que van de 8.47% en la superficie cumbral, 9.05% en el cauce y 11.76% en el dorso de ladera, mientras que los demás tamaños de agregados, muestran mayor variabilidad y menores porcentajes, con un rango de 2 a 8% de agregación del suelo (Tabla 3.3).

Los suelos quemados presentaron, al igual que los no-quemados, mayor proporción de agregados entre 2 y 4.75 mm, además tuvieron mayor cantidad de agregados en el cauce, salvo en el de mayor tamaño (>4.75 mm de diámetro); efecto contrario fue presentado por el dorso de ladera pues los agregados tuvieron menor cantidad, salvo en los de menor tamaño de 0.25-0.50mm de diámetro que aumentó (Tabla 3.3); Se encontró una tendencia al incremento en los micro-agregados, en las tres porciones de ladera, sobre todo en los menores a 0.5 mm. El cauce fue el que presentó siempre una mayor proporción de agregados en todas las fracciones. El efecto notorio del fuego se demostró en una disminución de los agregados >4.75 mm y un aumento de los micro-agregados.

pH

el ph de los sitios no-quemados de El Pelado fueron, en el cauce de 0-3 y 3-8 cm y en el dorso de ladera de 0-3 cm, ligeramente ácidos y en el dorso de ladera y en la superficie cumbral de 3-8 cm muy poco ácidos (Donahue *et al.*, 1988) (Tabla 3.4). Mientras que en los sitios quemados a las dos profundidades, del cauce y la superficie cumbral de 0-3 cm, fueron muy poco ácidos y

ligeramente ácidos en el dorso de ladera de 0-3 y 3-8 cm, y en la superficie cumbral de 3-8 cm. García y Maass (1998), mencionan que el incremento de pH es el resultado de la llegada de cenizas ricas en bases por la quema de la vegetación.

Tabla 3.3. Datos de estabilidad de agregados en El Pelado.

Agregados	Tratamientos		Diferencia (%)
	No-Quemado (%)	Quemado (%)	
>4.75 mm			
C	4.88	4.48	-0.4
L	6.64	2.62	-4.02
SC	4.78	2.62	-2.16
2.00-4.75 mm			
C	9.05	9.96	0.91
L	11.76	8.24	-3.52
SC	8.47	7.45	-1.02
1.00-2.00 mm			
C	3.72	5.23	1.51
L	5.81	4.24	-1.57
SC	3.51	3.39	-0.12
0.50-1.00 mm			
C	4.37	8.06	3.69
L	6.20	5.35	-0.85
SC	3.08	4.17	1.09
0.25-0.50 mm			
C	1.85	2.85	1.00
L	3.75	4.02	0.27
SC	2.02	2.79	0.77

C=cauce, L=dorso de ladera, SC=superficie cumbral.

Materia orgánica y carbón orgánico

Los suelos fueron clasificados como muy altos en materia orgánica en sus dos profundidades, el dorso de ladera tuvo menor porcentaje de materia orgánica con respecto al cauce y a la superficie cumbral (similar al caso de la Malinche) y mayor cantidad, a la profundidad de 3-8 cm, esto concuerda con lo reportado por Raghubanshi (1992), que menciona que los dorsos de laderas tienen menor porcentaje de materia orgánica que los demás tipos de relieve, debido a que el material es removido a mayor velocidad que la de su acumulación proveniente de las partes altas.

Después del incendio forestal, los suelos siguieron clasificados como muy altos en materia orgánica. De acuerdo con Rodríguez (1996) (Figura 2.5), los incendios dentro de las cañadas

registran mayores temperaturas que en la superficie cumbral, razón por la cual el cauce y el dorso de ladera aumentaron sus porcentajes, mientras que la superficie cumbral tuvieron menor porcentaje en las dos profundidades de muestreo (Tabla 3.4).

Capacidad de intercambio catiónico

La CIC en los suelos no-quemados dió los siguientes resultados. La superficie cumbral en la superficie fue de 35.97 y en la subsuperficie de 23.24 meq/100 g, los suelos del cauce y del dorso de ladera, generan mayor movimiento de partículas, por lo que el suelo que se llega a formar en la superficie es menos desarrollado y más inestable que en la parte subsuperficial, razón por la cual, de 3-8 cm, de esas dos porciones de ladera fue mayor la CIC que en la parte superficial. Los suelos quemados en los tres tipos de relieve tuvieron mayor capacidad de intercambio en la parte subsuperficial, siendo la superficie cumbral la de mayor diferencia.

Calcio y magnesio

El Ca^{++} y Mg^{++} en suelos sin alteración muestran que estos nutrimentos tienen mayores concentraciones en las partes subsuperficiales (Tabla 3.4). Como lo mencionan Galicia *et al.*, (1995) los suelos más profundos son más estables y los suelos menos profundos están bajo el proceso de erosión. En los suelos quemados la parte superficial contó con mayores concentraciones de estos nutrimentos que los de la parte subsuperficial, pues como se ha mencionado las cenizas ricas en bases generan mayor concentración de nutrimentos. La comparación entre los no-quemados y los quemados indican que la parte superficial del suelo fue la que presentó mayores diferencias con mayor énfasis en el cauce y la superficie cumbral.

Sodio y potasio

La parte superficial en suelos sin alteración y en los tres tipos de relieve muestran mayor cantidad de estos nutrimentos con relación a la parte subsuperficial, ya que en los suelos orgánicos estos nutrimentos se hallan disponibles para ser asimilados (Tabla 3.4). En lo referente a los suelos quemados, contaron con las mismas características que los no-quemados, pues en los tres tipos de relieve y en la profundidad superficial fue mayor la concentración.

Tabla 3.4. Resultados de las variables químicas en el área de El Pelado.

Variable		Tratamiento		Diferencia
		No-Quemado	Quemado	
pH	C 0-3	6.69 ± 0.00	6.44 ± 0.14 a	-0.25
	C 3-8	6.65 ± 0.16	6.33 ± 0.85 a	-0.32
	L 0-3	6.51 ± 0.10	6.64 ± 0.39 a	0.13
	L 3-8	6.28 ± 0.09	6.74 ± 0.28 a	0.46
	SC 0-3	6.47 ± 0.39	6.38 ± 0.49 a	-0.09
	SC 3-8	6.35 ± 0.01	6.53 ± 0.70 a	0.18
MO %	C 0-3	21.86 ± 2.5	26.64 ± 1.84 a	4.78
	C 3-8	17.86 ± 2.3	21.14 ± 1.0 b	3.28
	L 0-3	14.95 ± 1.0	20.08 ± 5.7 a	5.13
	L 3-8	15.86 ± 0.1	16.99 ± 3.9 b	1.13
	SC 0-3	18.44 ± 3.0	15.76 ± 0.8 a	-2.68
	SC 3-8	16.83 ± 2.2	13.39 ± 1.4 b	-3.44
C %	C 0-3	12.68 ± 1.4	15.44 ± 1.0 a	2.76
	C 3-8	10.36 ± 1.3	12.26 ± 0.6 b	1.9
	L 0-3	8.67 ± 0.6	11.64 ± 3.3 a	2.97
	L 3-8	9.20 ± 0.1	9.85 ± 2.2 b	0.65
	SC 0-3	10.69 ± 1.7	9.14 ± 0.4 a	-1.55
	SC 3-8	9.75 ± 1.3	7.76 ± 0.7 b	-1.99
CIC meq/100g	C 0-3	24.65 ± 3.1	26.97 ± 1.5 a	2.32
	C 3-8	34.21 ± 6.3	37.95 ± 2.2 b	3.74
	L 0-3	34.37 ± 4.2	36.88 ± 3.2 a	2.51
	L 3-8	42.43 ± 7.4	37.84 ± 3.7 b	-4.59
	SC 0-3	35.97 ± 2.1	25.73 ± 1.1 a	-10.24
	SC 3-8	23.24 ± 1.0	42.37 ± 3.6 b	19.13
Ca ⁺⁺	C 0-3	32.98 ± 1.4	84.60 ± 4.0 a	51.62
	C 3-8	60.99 ± 1.4	58.33 ± 1.1 b	-2.67
	L 0-3	58.50 ± 0.7	65.98 ± 1.7 a	7.48
	L 3-8	42.47 ± 2.1	54.48 ± 1.6 b	12.01
	SC 0-3	36.99 ± 1.4	60.48 ± 5.1 a	23.49
	SC 3-8	46.48 ± 2.1	52.88 ± 3.9 b	6.40
Mg ⁺⁺	C 0-3	51.25 ± 0.3	62.66 ± 1.4 a	11.41
	C 3-8	53.94 ± 3.5	51.82 ± 1.6 b	-2.13
	L 0-3	51.96 ± 2.8	51.07 ± 3.4 a	-0.89
	L 3-8	57.97 ± 2.8	36.46 ± 1.8 b	-21.51
	SC 0-3	25.31 ± 6.7	48.90 ± 3.3 a	23.60
	SC 3-8	44.00 ± 0.7	36.63 ± 1.8 b	-7.37
K ⁺	C 0-3	2.01 ± 0.15	2.78 ± 1.24 a	0.77
	C 3-8	1.61 ± 0.45	1.48 ± 0.23 b	-0.13
	L 0-3	1.62 ± 0.07	1.84 ± 0.84 a	0.22
	L 3-8	1.02 ± 0.18	1.17 ± 0.45 b	0.16
	SC 0-3	1.27 ± 0.39	1.32 ± 0.69 a	0.05
	SC 3-8	0.71 ± 0.13	0.87 ± 0.30 b	0.15
Na ⁺	C 0-3	2.82 ± 0.30	4.00 ± 1.43 a	1.18
	C 3-8	2.70 ± 0.83	2.16 ± 0.43 b	-0.54
	L 0-3	2.20 ± 0.39	3.06 ± 1.27 a	0.86
	L 3-8	1.59 ± 0.08	2.56 ± 0.50 b	0.97
	SC 0-3	2.08 ± 0.68	2.66 ± 0.98 a	0.59
	SC 3-8	1.27 ± 0.04	1.90 ± 0.44 b	0.63

MO=materia orgánica, C=carbón orgánico, CIC=capacidad de intercambio catiónico, pH=potencial de hidrógeno, Ca=calcio, Mg=magnesio, K=potasio, Na=sodio. C=cauce, L=dorso de ladera, SC=superficie cumbre. En la columna 3 y 4 (Media ± D.S.). Letras diferentes (a y b) entre las profundidades de la misma porción de ladera muestran diferencias significativas ($P<0.01$)

Fósforo

Los valores medidos de fósforo disponible en suelos no-quemados indican que el menor fue para la superficie cumbra,l con 10.3 ppm, después el dorso de ladera con 11.2 ppm y el mayor para el cauce con 11.3 ppm. En los suelos quemados tanto en el cauce como en el dorso de ladera las concentraciones fueron menores, debido a las temperaturas de volatilización durante el incendio. Sin embargo, de las muestras analizadas, la superficie cumbra,l presentó mayor cantidad (Figura 3.8), en 1.1 ppm. Esto se puede deber a que la superficie cumbra,l no alcanzó el intervalo de temperaturas necesarias para el proceso de volatilización, como los nutrimentos Ca^{++} , Mg^{++} , K^{+} y Na^{+} y sólo quedó disponible en la parte superficial.

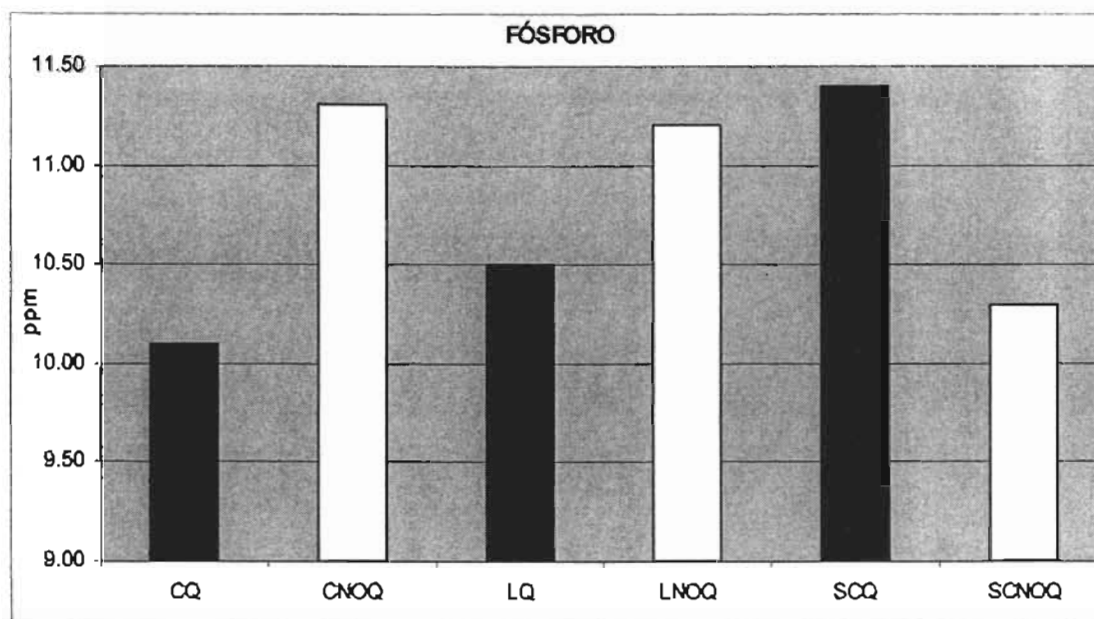


Figura 3.8. Valores de concentración de fósforo disponible en suelos quemados (Q) y no-quemados (NOQ), para una sola profundidad (0-3 cm), en El Pelado.

3.4 Análisis multivariado de agrupamiento (*Cluster*), en El Pelado

Suelo No-quemado.

El análisis de agrupamiento, dividió las variables en tres grupos. El dendrograma de la Figura 3.9 muestra el primer grupo (Grupo 1), integra estadísticamente a la materia orgánica con el carbón orgánico, estas variables mantienen una estrecha relación natural debido a que la materia orgánica contiene en promedio 58% de carbón orgánico (Fassbender y Bornemisza, 1994). Como

un subgrupo, se presentan las arenas con los agregados del tamaño de 0.25-0.50 mm de diámetro, esta agrupación es debido a la relación del tamaño similar de partículas, como son las arenas y los agregados de 0.25-0.50 mm de diámetro. La materia orgánica, es la variable de mayor importancia, porque determina la agrupación de las demás variables, como los agregados, ya que la materia orgánica tiende a unir las partículas minerales del suelo favoreciendo la estructuración y manteniendo un buen nivel de porosidad (Mahboubi *et al.*, 1993; Young, 1991).

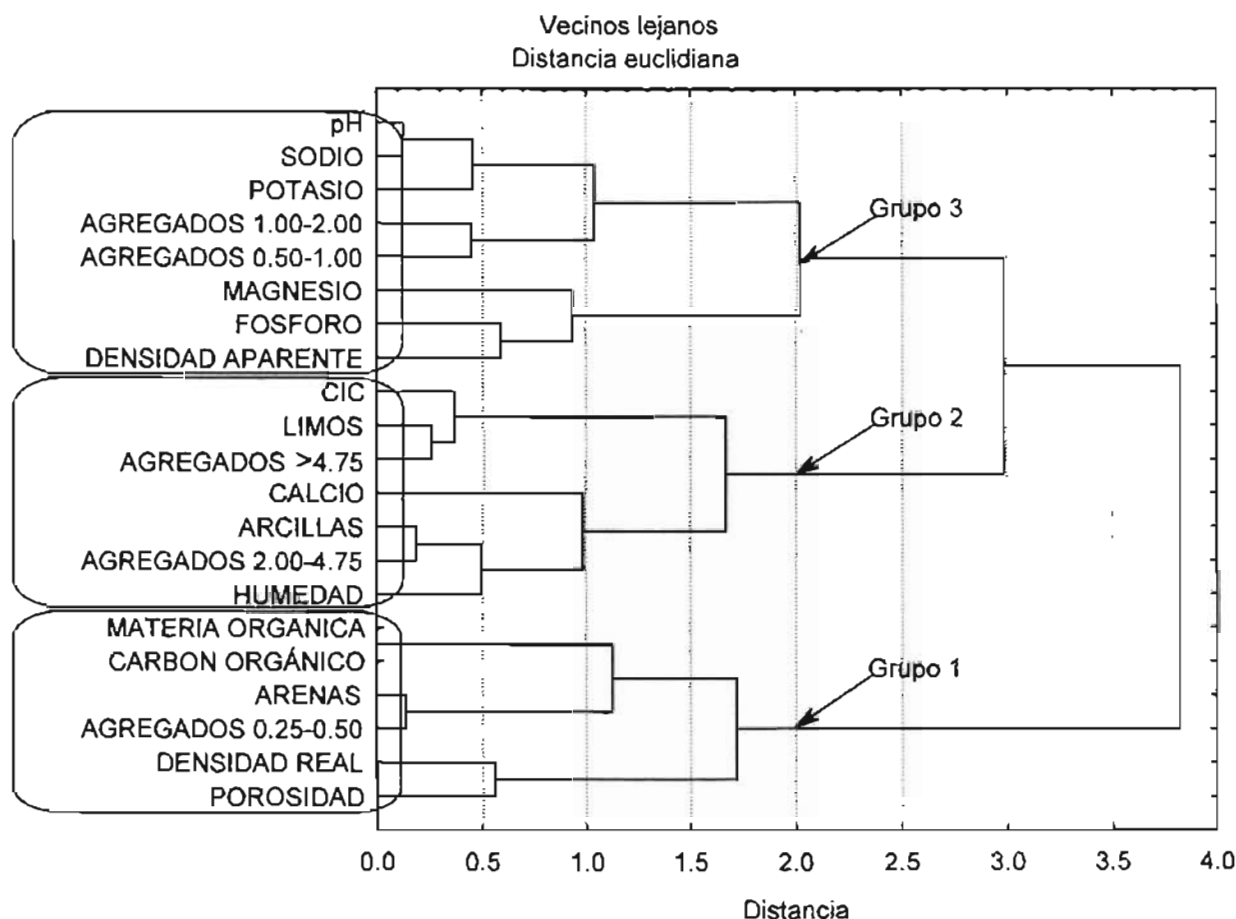


Figura 3.9. Dendrograma. El Pelado, suelo no-quemado.

El grupo dos vincula a las arcillas con los agregados de 2.00-4.75 mm de diámetro y la humedad. Las dos primeras variables mantienen relación por sus porcentajes entre 6 y 10%. Acevedo (2001), manifiesta que la formación de los agregados depende del contenido de humedad existente en el suelo, mismo que funciona como el catalizador natural de los agentes cementantes. Existe una agrupación que junta a los limos con la CIC. Aquí la mayor importancia es la relación

que Fassbender y Bornemisza (1994) explican que existe de un 10 a un 30% de la CIC en la fracción de limo con mayor proporción en suelos recientes, como podría ser el caso de estos suelos; asimismo, Sacchi y De Pauli (2002), mencionan que en un suelo prístino (sin alteraciones) la CIC está relacionada con los limos.

El grupo tres, conjunta al pH y al Na^+ con el K^+ . Se relacionan estrechamente por que el Na^+ es considerado como un parcial sustituto del K^+ en el micelio del suelo y la concentración de ambos iones está relacionada directamente con el pH (Navarro y Navarro, 2000). Los agregados con un tamaño de 1.00-2.00 y 0.50-1.00 mm de diámetro, se agrupan por la similitud del porcentaje y por el diámetro de las partículas.

Suelo quemado.

Los resultados presentados en el dendrograma de la Figura 3.10, muestran los siguientes grupos. El primer grupo delimita dos subgrupos, en el primero la materia orgánica y el carbón orgánico, con el Mg^{++} , el Ca^{++} , K^+ y el Na^+ . La respuesta para la relación de este agrupamiento es especificado por Young (1991), quien menciona que la materia orgánica libera nutrientes a las partes superficiales del terreno en una forma que es mayormente disponible para la absorción de las plantas, es por ello que al mineralizarse la materia orgánica aumenta su porcentaje y la cantidad de cationes intercambiables en los suelos.

El segundo grupo, conjunta la densidad aparente y los agregados de 2.00-4.75, >4.75, 1.00-2.00 y los de 0.25-0.50 mm de diámetro con las arenas, esto debido a que cuando el suelo se quema, los agregados más grandes se disgregan y los de tamaño de 2.00-4.75 mm de diámetro presentan un aumento en porcentaje lo cual justifica que su densidad aumente. Mientras que los agregados de 0.25-0.50 mm de diámetro se unen con las arenas por la relación de tamaño existente entre ellos, esto coincide por lo establecido Acevedo *et al.* (2001).

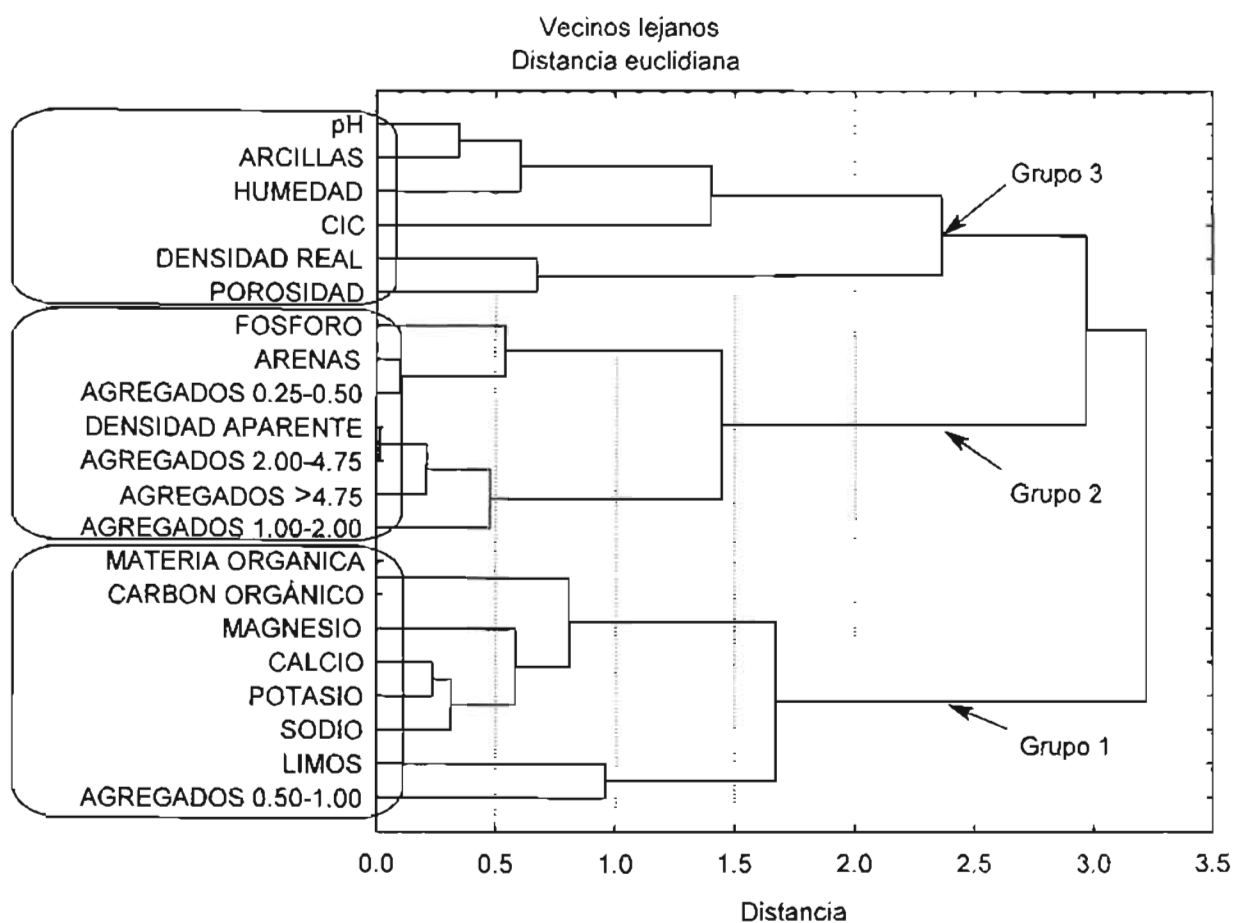


Figura 3.10. Dendrograma. El Pelado, suelo quemado.

El tercer grupo conjunta al pH con las arcillas, la humedad y la CIC. La reacción del suelo influye de modo notable en la solubilidad de gran número de compuestos, además de ser un proceso de gran importancia para la formación de arcillas y estas determinan la CIC en los suelos. Para que un catión sea absorbido por las raíces de las plantas, este debe ser soluble, siendo el agua el catalizador natural.

3.5 Discusión general

Dentro de las propiedades físicas de los suelos estudiados se observó que el efecto de los incendios forestales en la textura del suelo, ocasiono que no se presentaran grandes diferencias entre los suelos no-quemados y quemados, puesto que no existieron temperaturas importantes para la alteración de las características texturales. Esto concuerda con lo mencionado por Wells *et al.* (1979), sus estudios concluyen que para que los incendios forestales provoquen modificaciones importantes y directas en la textura del suelo necesitan tener altas temperaturas. Sin embargo, mencionan que algunas modificaciones indirectas por el fuego se pueden presentar con intensidades de medias a altas.

Los datos de densidad aparente fueron usados para estimar las diferencias de densificación ocurridas después de los incendios. Debido a que las características estructurales varían, es posible inferir compactación, por lo que el suelo fue más denso. En las dos áreas la densidad aparente presentó diferencias significativas, prácticamente en los tres tipos de relieve, salvo en el dorso de ladera de La Malinche, ya que resultó mayor en el suelo no-quemado. De acuerdo con Sacchi y De Pauli (2002), en suelos modificados los menores valores de porosidad se encuentran ligados con los mayores valores de densidad aparente, esto es similar al comportamiento en las áreas de El Pelado y La Malinche.

La densidad real en los suelos quemados disminuyó en todos los sitios de muestreo, esto concuerda a lo escrito por Baver *et al.* (1980), en el que mencionan que la densidad real está en función de la constitución química, mineralógica y el grado de hidratación del suelo y que durante un incendio forestal decrece la capa de humus que se encuentra en la parte superficial del terreno, propiciándose con esto, una reducción de la densidad real del suelo en las tres porciones de ladera.

Las condiciones óptimas para los suelos es que deben tener poros grandes entre los agregados y poros pequeños en el interior de estos, pero como la masa de suelo presentó baja densidad aparente o grandes espacios porosos, los procesos involucrados con el movimiento de agua y del aire fueron modificados. El espacio poroso posee dos componentes, uno textural que resulta del arreglo de las partículas minerales y se asocia a la porosidad intra-agregados y en estas áreas se

modificaron con el contenido de humedad. El otro estructural, que corresponde al arreglo de los agregados, se asocia a la porosidad inter-agregados y esta fue afectada por la densificación del suelo (Velásquez, 2002).

La porosidad del suelo, depende en gran medida de la intensidad del proceso de combustión y de la cantidad de materiales orgánicos que permanecieron después de la quema (Aguirre, 1978). La porosidad fue menor en los sitios quemados y en las tres porciones de ladera con mayor porcentaje en el cauce, para las dos áreas de estudio. La disminución afectó la aireación del suelo y la facilidad con que los nutrimentos son asimilados por las raíces. La porosidad también fue menor en los dorsos de las laderas y en la superficie cumbral, no obstante, el porcentaje se mantiene entre 40% y 60%, que de acuerdo con Young (1991), son los porcentajes óptimos para el desarrollo del suelo en los bosques. En general el porcentaje de los suelos quemados fue 10% menos poroso. Los cambios que presentaron los cauces con respecto a la porosidad se pueden deber al mayor tiempo de incidencia y mayor magnitud del fuego. Aunado a esto, los incendios ocurrieron en la época de secas, cuando el cauce no presenta movimientos marcados de sedimentos fluviales y por gravedad grandes cantidades de materiales combustibles se depositan en las partes bajas del cauce, logrando alcanzar los incendios forestales altas temperaturas.

En suelos forestales, la humedad depende en gran medida de la capa orgánica. En las áreas de estudio, al disminuir el espesor de la capa orgánica por efecto de la quema, la evaporación aumento. Esto corresponde con lo reportado por Ternan y Neller (1999), quienes mencionan que el porcentaje de agua es mayor en suelos no-quemados.

La estructura de cada agregado está en función de la cantidad y tamaño de las partículas individuales que los unen, sobre todo de las arcillas para los micro-agregados y la materia orgánica para los macro-agregados. En las áreas de estudio, el porcentaje de agregación del suelo es muy importante para el desarrollo vegetal, porque el aire y el agua pueden circular libremente por los espacios porosos y es de mayor importancia, pues en estos suelos el agua se podría perder fácilmente por gravedad. Sin embargo, un suelo bien agregado ayuda a impedir esta pérdida y permite el libre intercambio. Teuscher y Adler (1982), establecen que para que exista una buena estructura del suelo es necesario cumplir con ciertas características, las cuales son mencionadas a

continuación: a) Una reacción de pH entre 6.0 y 7.2; b) Un contenido favorable de humus y arcilla en proporciones adecuadas; c) Nivel medio o rico en calcio y d) Un porcentaje adecuado de humedad, ni muy alto ni muy bajo y que sea estable. Por lo tanto, los suelos de La Malinche y de El Pelado, se consideraron de buena agregación, ya que cumplen con la mayoría de las características antes mencionadas, salvo con la proporción adecuada de arcilla, ya que es muy baja en las dos áreas.

En la agregación, la quema de la materia orgánica fue un factor muy importante, ya que fue menor el porcentaje de los agregados más grandes y superior los de menor diámetro, atribuido a la disgregación de los más grandes. Estas modificaciones conllevan a variaciones químicas en el contenido y la forma en que se retienen los nutrientes y el carbono del suelo (Maass y Jaramillo, 1999).

Las propiedades químicas y los nutrientes de las áreas de estudio que fueron analizados presentaron diferencias significativas en sus dos profundidades 0-3 y 3-8 cm, en sus dos tratamientos (Q y No-Q) y en sus tres porciones de ladera (cauce, dorso de ladera, superficie cumbre). Los suelos no-quemados presentan altos valores de materia orgánica, carbón orgánico, y valores normales de pH y de CIC. Las tres primeras variables tuvieron mayores porcentajes en el horizonte superficial, mientras que la CIC fue mayor en el horizonte subsuperficial, para estos nutrientes en los dos horizontes. Sin embargo, existió mayor presencia de los nutrientes Ca^{++} y Mg^{++} , en el horizonte subsuperficial esto a lo establecido con Galicia *et al.*, (1995) pues mencionan que los suelos más profundos son más estables y los suelos menos profundos están bajo el proceso de erosión, mientras que los valores del K^+ y Na^+ fueron mayores en el horizonte superficial.

La materia orgánica que se quemó fue la propiedad de mayor importancia, pues en el desarrollo del suelo es determinada como la parte primordial, ya que en ella se realizan la mayor cantidad de procesos físicos y químicos. En suelos quemados se presentan valores más altos de los nutrientes Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ y Na^+ , lo que concuerda con los datos obtenidos por Alauzis *et al.* (2004) y por Marafa y Chau (1999). Por lo tanto al incrementarse las bases nutritivas en la parte más superficial del terreno, se acrecentó la fertilización, ya que las cenizas producidas por

el fuego crean mayores cantidades de nutrientes disponibles en el suelo. Sin embargo, esto hay que tomarlo con reserva dado que Maass y Jaramillo (1999), citan a Kauffman *et al.* (1993), las cuales describen que hasta un 57% de las cenizas depositadas por el fuego se erosionan por el viento, dos semanas después de la quema. Por su parte, Alauzis *et al.* (2004) mencionan que después de un incendio forestal el incremento de estos nutrientes es de carácter transicional, ya que realizaron un trabajo de comparación en los mismos sitios de muestreo después de dos años, dando como resultado el empobrecimiento de los valores de Ca^{++} y Mg^{++} .

El caso del fósforo se contrapone con los resultados obtenidos en los nutrientes de Ca^{++} , Mg^{++} , K^{+} y Na^{+} , pues presentó cantidades menores prácticamente en todos los sitios quemados, pues como lo mencionan Maass y Jaramillo (1999) el fósforo es un elemento proclive a perderse por volatilización a temperaturas entre 200 y 360°C, por lo tanto es muy probable que se halla perdido con mayor facilidad.

Por lo que respecta a los tipos de relieve, el cauce fue en donde se presentaron las mayores diferencias entre sitios no-quemados y quemados después el dorso de ladera y por último la superficie cumbre. Estas modificaciones fueron producto de la intensa quema, por dos razones principales, la primera por la posición del relieve, ya que el fuego permaneció más tiempo en el cauce y en el dorso de ladera, este fenómeno es ejemplificado por Rodríguez (1996) en la Figura 1.12. La segunda porque en el cauce se halló mayor porcentaje de materia orgánica, misma que funge como material combustible que ayuda al incendio a tener altas temperaturas. Estas transformaciones sugieren que en la superficie cumbre se presentan las menores diferencias durante los incendios forestales, por las temperaturas, pero también se infiere que tienen menor posibilidad de ser erosionadas, debido a que poseen mayor capacidad amortiguadora para resistir la pérdida de nutrientes, pues la materia orgánica le permite mayor control edáfico (García y Maass, 1998), además al tener pendientes menos pronunciadas los procesos erosivos son menos intensos y de menor energía.

Capítulo 4

Conclusiones

Las diferencias en las propiedades físicas causadas por el fuego fueron notables, entre ellas la densidad aparente y la estabilidad de los agregados. Ambas propiedades tuvieron valores más altos que en los suelos no-quemados, mientras que la densidad real, la porosidad y la humedad tuvieron valores menores. Estas modificaciones fueron mayores en el cauce y en el dorso de ladera, que en la superficie cumbral, efectos atribuibles a la posición topográfica del relieve en donde comienza un incendio forestal. Sin embargo la textura no difirió entre los sitios no-quemados y quemados, probablemente por las intensidades de las temperaturas.

Se registró en el laboratorio que en los suelos de las dos áreas de estudio, el pH pasó de ligeramente ácido a neutro en el área de la Malinche; mientras que en El Pelado no presentó cambios de importancia. Los nutrimentos K^+ y Na^+ tuvieron mayores cantidades en la parte superficial, mientras Ca^{++} y Mg^{++} fueron mayores en la subsuperficial. Después de los incendios forestales estos nutrimentos incrementaron considerablemente su concentración en el suelo sobre todo en la superficie (0-3 cm de profundidad) del cauce y del dorso de ladera.

Los resultados sugieren que las propiedades físicas y químicas del suelo fueron diferentes por la intensidad y propagación de los incendios forestales y el tipo de relieve de la siguiente manera: Los cauces y los dorsos de las laderas fueron los que presentaron mayores modificaciones. Por la diferencia de magnitudes de temperatura durante el tiempo de incidencia de los incendios entre las tres posiciones de ladera. La diferencia entre las porciones de ladera, fue que los incendios ocurrieron en la época de secas, cuando el cauce contiene grandes cantidades de materiales combustibles depositados por gravedad en las partes bajas, también se atribuye a que la dinámica de los nutrimentos está controlada por procesos físicos y químicos asociados al desarrollo del suelo con relación al relieve. Es por ello, que las superficies cumbrales tuvieron diferentes características, primero, por el menor tiempo de duración de los incendios, mismos que no lograron generar temperaturas para calcinar los materiales combustibles, pues en campo se pudo apreciar que los pastizales no fueron quemados completamente en estas superficies de relieve y segundo, porque los suelos al ser más desarrollados y estables presentan mayor capacidad edáfica y menor vulnerabilidad para modificarse por efecto del fuego.

El fósforo tuvo una tendencia muy clara a disminuir en las dos áreas de estudio, salvo en la superficie cumbral de El Pelado. Esto puede estar relacionado con los incendios forestales mismos que lograron alcanzar temperaturas entre 200 y 360°C suficientes para que el fósforo se volatilizara.

El efecto del enriquecimiento en la fertilidad del suelo en las áreas quemadas se debió al incremento de los nutrimentos resultado de la liberación en la vegetación durante la quema, ya que son vitales para el renuevo de la vegetación. Sin embargo, este enriquecimiento es transitorio, pues los fenómenos como lixiviación, erosión eólica, fluvial y volatilización, son acelerados conduciendo a un empobrecimiento del suelo a mediano y largo plazo.

Fue considerada la materia orgánica como una propiedad fundamental, para la realización de los procesos físicos y químicos primordiales para el desarrollo del suelo. Entre ellos generó buena estructura, porosidad, aireación e infiltración del agua y mayor capacidad de intercambio y contenido de nutrientes. Los valores de contenido de materia orgánica presentaron diferentes características, en los distintos tipos de relieve, como el cauce y el dorso de ladera, ya que propició que la quema tuviera mayor magnitud y duración, provocando mayores diferencias en las propiedades físicas y químicas, mientras que en la superficie cumbral las diferencias fueron menores, debido a que se desplazó rápidamente teniendo menor magnitud y duración.

La evaluación del suelo dentro de los incendios forestales estudiados cumplió con lo establecido en el objetivo general, pues dio a conocer la perturbación ambiental que tuvieron las áreas de La Malinche y El Pelado, donde las diferencias fueron representativas tanto de las variables físicas y químicas como de las diferentes porciones de ladera. Pues se comprobó que después de quemarse los cauces y los dorsos de ladera, a la profundidad de 0-3 cm, fueron más dinámicos con respecto a las superficies cumbrales.

El conocimiento nuevo que ha resultado de este trabajo corresponde a que se encontró que existe un enriquecimiento del suelo por el incremento de nutrimentos a partir de la integración en el suelo de las cenizas minerales. Sin embargo, existe el problema de que las áreas incendiadas sufrieron un aumento en la densidad aparente del suelo lo cual genera que sean, esas áreas, más

propensas a la presencia de procesos degradativos, como la erosión del suelo y la lixiviación de los nutrimentos a corto plazo.

Una posible utilidad de este trabajo es que puede servir como información fundamental para apoyar el proceso de planeación ambiental del territorio, dentro de los aspectos de evaluación de peligros a incendios y de degradación del suelo. Asimismo, presenta un aporte fundamental con miras a establecer una cultura forestal, que ayude a la prevención, control y manejo adecuado de los incendios forestales.

Literatura Citada

-Acevedo, O.A., Velázquez Rodríguez, A. Y Flores Román, D. (2001) Agregación por especies vegetales y abonos orgánicos en tepetates fracturados en condiciones de invernadero. Revista TERRA, oct-dic 2001. Vol. 19, Núm. 4: 363-373 p.

-Aguado, I. y Camia, A. (1998) Fundamentos y utilización de índices meteorológicos de peligro de incendio. En: Serie Geográfica. Num. 7. 1997-1998. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, España. 23-36 p.

-Aguilera, C.M. y Martínez, E.R. (1980) Relaciones agua, suelo, planta, atmósfera. Ed. UACH. México. 321 p.

-Aguirre, B. C. (1978) Efecto del fuego en algunas características y propiedades de suelos forestales. Tesis Profesional. Depto. de Bosques, ENA. Chapingo, México. 270 p.

-Aguirre, B. C. y Rey, C.J. (1980) Escorrentía y pérdida de suelo en asociaciones vegetales sujetas a quemas controladas. Rev. Chapingo 23-24: 18-24 p.

-Alauzis, M.V., Mazzarino, M.J., Raffaele, E. and Roselli, L. (2004) Wildfires in NW Patagonia: long-term effects on a *Nothofagus* forest soil. Forest Ecology and Management 192: 131-142 p.

-Allende, L.R. (1968) Introducción al estudio de suelos derivados de cenizas volcánicas o de ando del volcán La Malinche. Tesis de licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, UNAM. México, DF.

-Andrev, V., Imeson, A.C. and Rubio, J.L. (2001) Temporal changes in soil aggregates and water erosion after a wildfire in a Mediterranean pine forest. *Catena* 44: 69-84 p.

-Arellano, R.A. (2001) Delimitación de unidades ambientales por medio de una regionalización geomorfológica del mesobloque “El Encantado”, Oaxaca. Tesis de Licenciatura en Geografía, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. 143 p.

-Arellano R.A., López Blanco, J. y Villers R.L. (2001) Mapeo de cobertura vegetal del Parque Nacional La Malinche, fotointerpretación y corrección fotogramétrica en línea. XVI Congreso Nacional de Geografía, Mérida. 6-8 Junio. P162-175.

-Arshad, M.A., Lowery, B. and Grossman, B. (1996) *Physical tests for monitoring soil quality*. 123-141. In: Doran, J.W. and Jones, A.J. (Ed) *Methods for assessing soil quality*: Soil Science Society of America, 1996. (SSSA special publication, 49).

-Baver, L.D., Gardner, W.H. y Gardner W.R. (1980) *Física de Suelos*. UTEHA. México, D.F. 529 p.

-Benítez, B. G. (1986) *Árboles y flores del Ajusco*. Instituto de Ecología, Museo de Historia Natural de la Ciudad de México. México, D.F. 1986. 183 p.

-Bergsma, E., Charman, P., Gibbons, F., Hurni, H., Moldenhaver, W.C. and Parichapong, S. (1996) *Terminology For Soil Erosion and Conservation*. 313 p.

-Binkley, D., Becker-Heidmann, J.P., Clark, J.S., Crutzen, P.J., Frost, A.M., Gill, A., Granstrom, F., Mack, J.C., Menaut, B., van Wilgen. and Wein R.W. (1993) *Impacts of Fires on Ecosystems*. En: *Fire in the Environment: The Ecological, Atmospheric and Climatic Importance of Vegetation Fires*. Crutzen, P.J. Goldammer, J.G. (eds). 359-374 p.

-Birkeland, M. M. (1999) Soils and Geomorphology, Third Edition. Oxford University Press, Inc. 430 p.

-Bockheim, J.G. (1991) Suelos forestales. En: Young, R.A. (1991) Introducción a las ciencias forestales. Ed. Limusa, México. 522 p.

-Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agron. J. 54:464-465.

-Bray, R.H., and Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci. 59: 39-45 p.

-Bruce-Okine, E. and Lal, R. (1975) Soil erodibility as determined by raindrop technique. Soil Sci., 119. 149-157 p.

-Buckman, H.O. y Brady, N.C. (1977) Naturaleza y propiedades de los suelos. Montaner y Simons S.A. Barcelona. 590 p.

-Buol, S.W., Hole, F.D. y McCracken, R.J. (1988) Génesis y clasificación de suelos. Ed. Trillas. Mexico D.F. 417 p.

-Burton *et al.* (1978) The environment as hazard. New York: Oxford Univ. Press.

-Cannon, S.H., Kirkham, R.M. and Parise, M. (2001) Wildfire-Related Debris-Flow Initiation Processes, Storm King Mountain, Colorado. Geomorphology 39: 171-188 p.

-Castro, G.R. (1999) Historia eruptiva reciente del Volcán La Malinche. Tesis de Maestría en sismología y física del interior de la tierra. Posgrado de Geofísica, Instituto de Geofísica, UNAM. 129 p.

- Cavazos, T. y Rodríguez, O. (1992) Manual de Prácticas de Física de Suelos. Ed. Trillas, México. 99 p.
- Cedeño, S.O. (1999) Incendios Forestales en México en 1998: magnitud, extensión, combate y control. En: Revista Ciencia Forestal en México Vol. 20 Núm. 77. México, DF. Enero-Junio 1995. 228 p.
- CETENAL (1979) E14 A49 Milpa Alta. Carta edafológica 1:50 000. México.
- Comisión Coordinadora para el Desarrollo Agropecuario (COCODA) (1984) Programa Rector de Uso de Suelo y Desarrollo Agroforestal (PRUSDA). Ed. Departamento del Distrito Federal (DDF), México, Tomo I. 265 p.
- CONAF (1998) Foro Nacional Sobre los Incendios Forestales en el Contexto de Desarrollo Rural, Memoria. 14 y 15 de octubre 1998. Publicación: CONAF-001-98.
- Comisión Nacional del Agua (1990) Claves para la taxonomía de suelos. Por equipo de levantamiento de suelos, Servicio de conservación de suelos, Departamento de Agricultura de los E.U.A. Traducción Ortiz-Solorio, A. México, 1990. 576 p.
- Cooper, C. (1961) The Ecology of Fire. In: Ecology, Evolution and Population Biology. Readings from Scientific American. W.H. Freeman and Co San Francisco. 294- 302 p.
- DeBano, L.F. (1991) The effect of fire on soil properties. In: Proceedings-Management and Productivity of Western-Montane Forest Soils. 151-155 p.
- DeBano, L.F., Neary, D.G. and Ffolliott, P.F. (1998) Fires effects on ecosystems. John Wiley and Sons (eds). 331 p.
- Demant, A. (1978) Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. Instituto de Geología, UNAM. México. Revista, Vol. 2, Num. 2, 172-187 p.

- Donahue, R.L., Millar, R.W. y Shickluna, J.C. (1988) Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas. Prentice Hall. 624 p.
- Dragovich, D. and Morris, R. (2002) Fire Intensity, Run-off and Sediment Movement in Eucalypt Forest Near Sydney, Australia. In: Allison, R.J. (ed). *Applied Geomorphology: Theory and Practice*. 145-163 p. John Wiley and Sons.
- Fassbender, H.W. y Bornemisza, E. (1994) Química de Suelos con Énfasis en Suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica. 420 p.
- FitzPatrick, E.A. (1996) Introducción a la ciencia de los suelos. Editorial Trillas, México. 288 p.
- Foth, H.D. (1996) Fundamentos de la ciencia del suelo. John Wiley and Sons. Inc. 433 p.
- Flores, G.J. y Benavides, S.J. (1995) Efectos de las quemas prescritas sobre algunas características del suelo en un rodal de pino. *Revista Ciencia Forestal en México* Vol. 20 Núm. 77. México, 228 p.
- Freund, J.E. (2004) *Modern Elementary Statistics*. Pearson Prentice Hall. 545 p.
- Fuller, M. (1991) *Forest Fires: An Introduction to Wildland Fire Behavior, Management, Firefighting and Prevention*. John Wiley and Sons, Inc. 238 p.
- Galicia, L., García-Oliva, F. y López-Blanco J. (1995) Efecto de la estructura jerárquica del relieve en la distribución de las características físicas de los suelos en una cuenca tropical estacional mexicana. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. num. 3. México. 53-76 p.

- Galicia, L., López-Blanco J., Zarco-Arista, A.E., Filips, V. y García-Oliva, F. (1999) The relationship between solar radiation interception and soil water content in a tropical deciduous forest in Mexico. CATENA 36: 153-164 p.
- Gandoy, B.W. (1991) Manual de laboratorio para el manejo físico de suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. Colección Cuadernos Universitarios Serie Agronomía 22. 173 p.
- García, E. (1988) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, (para adaptarlo a las condiciones de la Republica Mexicana), offset Larios, 4^a. Ed., México.
- García, O.F. y Maass, J.M. (1998) Efecto de la transformación de la selva a pradera sobre la dinámica de los nutrientes en un ecosistema tropical estacional en México. Bol. Soc. Bot. México 62: 39-48 p.
- García-Oliva, F., Sanford, R.L. and Kelly, E. (1999) Effects of slash and burn management on soil aggregate organic C and N in a tropical deciduous forest. Geoderma 88: 1-12 p.
- García-Quiroz, 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 en Biología, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. 61 p.
- Gares, P.A., Sherman, D.J. and Nordstrom, K.F. (1994) Geomorphology and natural hazards. Geomorphology, 10: 1-18 p.
- Giovannini G., Vallejo R., Luccesi S., Bautista S., Ciompi S. and Llovet J. (2001) Effects of land use and eventual fire on soil erodibility in dry Mediterranean conditions. Forest Ecology and Management 147: 15-23 p.
- González, J.G. (1982) El Volcán El Pelado como reserva natural. Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, UNAM. México, DF. 82 p.
- Hardy, F. (1970) Suelos Tropicales, con énfasis en América. Editorial Herrero Hermanos. 334 p.

- Herre, A. (2000) Determinación de la densidad aparente (método del cilindro). PRESOP Laboratorio de Edafología Ambiental. Instituto de Geología, UNAM.
- INEGI (1983) E14 A49 Milpa Alta. Carta de Uso de suelo y Vegetación 1:50 000. México.
- Inbar, M., Tamir, M. and Wittenberg, L. (1998) Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel a Mediterranean area. *Geomorphology* 24: 17-33 p.
- Jackson, L.M. (1976) *Análisis Químico de Suelos*. Ed. Omega, 1era edición, Barcelona, España, 662 p.
- Jalaluddin, M. (1969) Microorganic colonization of forest soil after burning. *Plant and Soil*, 30: 150-152 p.
- Johnson, E.A. (1992) *Fire and Vegetation Dynamics: Studies from the North American Boreal Forest*. University Press Cambridge, Great Britain. 129 p.
- Johnson, D.E. (1998) *Métodos multivariados aplicados al análisis de datos*. Ed. Brooks Cole Publishing Company. 566 p.
- Kauffman, J., Sanford, R., Cummings, D., Salcedo, I. and Sampaio, E. (1993) Biomass and nutrient dynamics associated with slash fires in neotropical dry forests. *Ecology*, 74. 140-151 p.
- Kirkby, M.J. y Morgan, R.P.C. (1984) *Erosión de suelos*. Ed. Limusa, México. 375 p.
- Lal, R. (1987) *Tropical Ecology and Physical Edaphology*. Part III. John Wiley and Sons (eds). 443-684 p.
- Lugo, H.J. (1984) *Geomorfología del sur de la cuenca de México*. Serie Varia, 8. 86 p.

- Martin del Pozzo, A.L. (1980) Vulcanología de la Sierra Chichinautzin. Tesis de Maestría Facultad de Ciencias, UNAM. 131 p.
- Martin, M.P., Chuvieco, E. Y Aguado, I. (1998) La incidencia del fuego en España. En: Serie Geográfica. Num. 7. 1997-1998. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, España. 23-36 p.
- Maass, M. y Jaramillo, V. (1999) Impacto de los incendios en el suelo. Ciencia Forestal en México Vol. 20 Núm. 77. México, DF. Ene-Jun 1995. 228 p.
- Maass, M., Jordan, C.F. and Sarukhan, J. (1988) Soil Erosion and Nutrient Losses in Seasonal Tropical Agroecosystems Under Various Management Techniques. Journal of Applied Ecology, 25. 595-607.
- Mahboubi, A.A., Lal, R. and Faussey, N.R. (1993) Twenty-eight years of tillage effects on two soils in Ohio. Soil Sci. Soc. Ame. J. 57. 506-512 p.
- Marafa, L.M. and Chau, K.C. (1999) Effect of Hill Fire on Upland Soil in Hong Kong. Forest Ecology and Management 120: 97-104 p.
- Mooser, F. (1975) The Mexican Volcanic Belt: interpretation derived from fractures and forms. Eos. Trans. Amer. Geophys. Union. v. 56 p.
- Munsell 1994 Soil Color Charts. Ed. Munsell Color Company Inc. New Winsor, New York, USA.
- Navarro, B.S. y Navarro, G.G. (2000) Química agrícola. Ed. Mundi-Prensa. 488 p.
- Nelson, M.R. (2001) Water Relations of Forest Fuels. In: Johnson. E.A. y Miyanishi, K. (eds). Forest fires: Behavior and Ecological Effects. 79-150 p.

- Palmer, G. y Troeh, R. (1980) Introducción a la ciencia del suelo: Manual de laboratorio. 158 p.

- Paré, O.L. (1999) Causas estructurales de los incendios. pp 19-30. En: Santiago Fragoso, H., Servin Massieu, M., Rodarte Ramón, H., Garfias y Ayala, F. (eds). Incendios forestales y agropecuarios: prevención e impacto y restauración de los ecosistemas. UNAM, SEMARNAP, IPN. México.

- Peech, M., L.T. Alexander, L.A. Dean, and J.F. Reed. 1947. Methods of soil analysis for soil fertility investigations. U.S. Dept. Agr. C. 757. 25 p.

- Potash and Phosphate Institute (PPI) (1997). Manual Internacional de Fertilidad de Suelos. 95 p.

- Pritchett, W.L. (1986) Suelos forestales, propiedades conservación y mejoramiento. Limusa, México. 566 p.

- Programa Integral de Prevención y Combate de Incendios Forestales del Distrito Federal (2001-2002). Reporte final julio 2002. Gobierno del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente y Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural. México. 30 p.

- Pyne, S., Andrews, P. and Laven, R. (1996) Introduction to Wildland Fire. Second Edition, John Wiley and Sons, Inc.

- Raghubanshi, A.S. (1992) Effect of topography on selected soil properties and nitrogen mineralization in a dry tropical forest. Soil Biology and Biochemistry, 24. 145-150 p.

- Rodríguez, D.A. (1996) Incendios Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. Mundi prensa México. 630 p.

-

- Rodríguez, D.A. y Sierra, P.A. (1995) Evaluación de los combustibles forestales en los bosques del Distrito Federal. En: Revista Ciencia Forestal en México Vol. 20 Núm. 77. México, DF. Ene-Jun 1995. 228 p.

- Rzedowski, J. (1978) Vegetación de México. Ed. Limusa, México.

- Sacchi, G. y de Pauli, C. (2002) Evaluación de los cambios en las propiedades físicas y químicas de un Argiustol Údico por procesos de degradación. Agrociencia. Vol. VI. Num 2. 37-46 p.

- Sala, S.M. y Batalla, V.R. (1996) Teoría y Métodos en Geografía Física, Ed. Síntesis, México. 303 p.

- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) (1978) Métodos para el análisis físico y químico de suelos, aguas y plantas. Publicación núm. 10, 2ª Ed, México. 201 p.

- Siebe, C., Rodriguez Lara, V. Schaaf, P. and Abrams, M. (2004) Radiocarbon ages of holocene Pelado, guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City: implications for archaeology and future hazards. Bulletin of Volcanol. 66. 203-225 p.

- Spiegel, M.R. (1991) Estadística. McGraw Hill. 556 p.

- SPP. (1981) Síntesis Geográfica de Tlaxcala. México.

- Soil Science Society of America (1965) Glossary of Soil Science Terms. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 29 (3). 331 p.

- Spurr, S.H. y Barnes, B.V. (1980) Ecología forestal. 690 p.

- Sreenivasan, A. y Aurangebhadkar, R.K. (1940) Effect of fire-heating on the properties of black cotton soil in comparison with those of gray and humus treated soils. Soil Sci., 50. 449-462 p.

- STATISTICA (2001). StatSoft, Inc. (data analysis software system), version 6. www.statsoft.com.

- Ternan, J.L. and Neller, R. (1999) The Erodability of Soils Beneath Wildfire Prone Grasslands in the Humid Tropics, Hong Kong. CATENA 36: 49-64 p.

- Teuscher, H. y Adler, R. (1982) El Suelo y su Fertilidad. Reinhold Publishing Corporation-New Cork. 509 p.

- Torres, P.A. (1998) Desarrollo agrícola regional e indicadores de sustentabilidad en la Ciudad de México. En: CONSERVA, Recursos Naturales Desarrollo Sustentable, UAM-UI. México. 276 p.

- Trápaga, D.Y. (2002) El Bosque en llamas. En Desastres Naturales en América Latina. Lugo, H.J. e Inbar, M. (compiladores). Fondo de Cultura Económica. México. 223-240 p.

- True, A. (ed) (2001) Wildfire a reader. Island Press. 246 p.

- Vela, C.G., Rodríguez, G.L., García, C.A. y Flores, R.D. (2004) Propiedades edáficas y calidad de sitio de áreas reforestadas en la Sierra de Guadalupe, Distrito Federal. Elaborado para: Consejo de estudios para la restauración y valoración ambiental (CONSERVA). México. 125 p.

- Velásquez, R.A.S. (2002) Especies vegetales, abono y fertilizante: su influencia en la calidad de un tepetate de Tetela del Volcán, estado de Morelos. Tesis de doctorado. Postgrado en Ciencias Biológicas de la Facultad de Ciencias. UNAM 126 p.

- Viegas, D.X. (1989) Manual sobre incendios forestais. Lisboa, Secretaria Geral do Ministerio do Planteamiento e da Administracao do Territorio.

- Villers, R.L. y López-Blanco, J. (2004) comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: un estudio en el Volcán La Malinche. En: Incendios forestales en México: Métodos de evaluación. UNAM. CCA. 61-78.

- Villers, R.L., Peña, A.E. y Arellano, M.A. (2002) Recurrencia de los incendios forestales en El Volcán La Malinche y la presencia del fenómeno del niño 1998. En: INEGI. México en su unidad y diversidad territorial. Tomo I. 162-175.
- Viro, P.J. (1974) Effects on fire on Grasslands. In: Kozlowski. T.T. and Ahlgren C.E. (eds). Fire and Ecosystems. Academic Press. 139-194 p.
- Walkley, A. and Black, I. (1947) An Examination of the deghthareff method for determining soil organic and a proposed modification of chromic aciditration method. Soil Science 37: 29-38 p.
- Wells, C.G., Campbell, R.E., DeBano, L.F., Lewis, C.E., Fredriksen, R.L., Franklin, E.C., Froelich, R.C. and Dunn, P.H. (1979) Effects of fire on soil: A state-of-knowledge review. U.S.D.A. Forest Service. General Technical Report WO-7. Washington, D.C. U.S.A. 34 p.
- Werner, G. (1974/76) Mapa de Suelos de la Cuenca Alta Puebla-Tlaxcala y sus Alrededores. Instituto de Edafología y Conservación de Suelos de la Universidad Justas Liebig de Huyesen, Republica Federal de Alemania. Escala 1:100 000,
- Werner, G. (1978) Suplemento Comunicaciones “Proyecto Puebla-Tlaxcala VI”, Titulo: Los suelos de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores (comentarios a un mapa de suelos con 4 mapas). Fundación Alemana para la Investigación científica. Puebla, México. 95 p.
- Whelan, R.J. (1998) The ecology of fire. University Press Cambridge.
- Wilson, L. (1968) Slopes. In: R.W. Fairbridge, The Encyclopedia of geomorphology, Reinhold, New Cork. 1002-1020 p
- Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis and study of physical nature of erosion losses. J. Am. Soc. Agron. 28: 337-351 p.
- Young, R.A. (1991) Introducción a las ciencias forestales. Ed. Limusa. México. 632 p.

ANEXO 1

TÉCNICAS DE LABORATORIO

COLOR DEL SUELO (*Munsell Soil Chart, 1994*)

MATERIAL:

- | | |
|---------------------------|----------------------|
| • Placa de porcelana | • Gotero |
| • Cartas de color Munsell | • Suelo tamizado 2mm |

MÉTODO:

1. Tomar suelo seco y colocarlo en la placa de porcelana y comparar a la luz natural su color con las tablas Munsell.
2. Al mismo suelo humedecerlo con un gotero, cuidando que no quede saturado de agua y comparar su color con las tablas Munsell.
3. Anotar la clave de los colores de la siguiente forma:

Donde:

-10 YR = *MATIZ*, se toma de la parte superior derecha de la tabla.

-3/ = *VALUE* (brillantez), está indicado en forma vertical en el lado izquierdo de la tabla.

-/2 = *CROMA* (intensidad), se lee en forma horizontal en la parte inferior de la tabla y se anota su valor correspondiente en la parte inferior.

COLOR = Con los valores de matiz, value y croma se busca en la parte opuesta de la tabla y se anota el nombre del color en español.

TEXTURA (*Método del hidrómetro de Bouyoucos*)

MATERIAL	REACTIVOS
• Agitadores de vidrio	• Metasilicato de sodio al 5%
• Balanza granataria	• Oxalato de sodio al 5%
• Baño María o platina caliente	• Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) al 8%
• Batidora OSTER	
• Hidrómetro de Bouyoucos	

- Pipetas graduadas (2 de 10 mL)
 - Probetas de 1000 mL
 - Termómetro
 - Vasos de precipitados de 500 mL
-

MÉTODO:

1. Pesar 55 g de suelo y colocarlo en un vaso de precipitados de 400 ó 500 mL.
2. Agregar dos veces 25 mL de peróxido de hidrógeno al 8% y mezclarlo con un agitador de vidrio.
3. Secar en baño María o en platina.
4. Pesar 50 g de suelo seco.
5. Colocarlo en el vaso de la batidora.
6. Agregar 5 mL de oxalato de sodio al 5%.
7. Agregar 5 mL de metasilicato de sodio al 5%.
8. Agregar agua corriente hasta la segunda ranura del vaso de la batidora.
9. Agitar 10 minutos (si el suelo es arcilloso agitar 15 minutos).
10. Pasar a una probeta de 1000 mL.
11. Aforar a 1000 mL con agua de la llave.
12. Agitar 1 minuto (para que la muestra quede homogénea), reposar 40 segundos y tomar la primera lectura con el hidrómetro.
13. Medir y anotar la temperatura.
14. Reposar 2 horas y tomar la segunda lectura.
15. Medir y anotar la temperatura (agregar 0.2 a la lectura por cada grado de temperatura después de 20 °C ó restarlos en caso contrario).
16. Hacer los cálculos y ver la textura en el triángulo.

CÁLCULOS.

Determinación de la textura:

$$\% \text{ de limos} + \% \text{ de arcillas} = \frac{\text{Primera lectura (100)}}{\text{g de suelo}}$$

$$\% \text{ de arena} = 100 - (\% \text{ de limos} + \% \text{ de arcillas})$$

$$\% \text{ de arcillas} = \frac{\text{Segunda lectura (100)}}{\text{g de suelo}}$$

$$\% \text{ de limo} = \text{se resta al \% de limos + arcillas el \% de arcilla}$$

DENSIDAD APARENTE (*Método del cilindro, Herre, 2000*) y **HUMEDAD DEL SUELO**
(*Método gravimétrico, Baver, 1973*)

MATERIAL:

• Cilindros de volumen conocido	• Estufa
• Papel aluminio	• Desecador
• Cajas de Petri	• Balanza digital

MÉTODO:

1. A las muestras inalteradas de suelo, recolectadas en campo, y cubrir con papel aluminio.
2. Posteriormente se colocan en cajas de Petri dentro de la estufa a una temperatura de 105 °C, durante 24 horas.
3. Cumplidas las 24 horas las muestras se colocan en un desecador, para ser pesadas cuando se enfriaran a peso constante.

CÁLCULOS:

-Para determinar la densidad aparente:

$$D_a (\text{g/cm}^3) = \text{peso del suelo seco (g)} / \text{volumen del cilindro (cm}^3\text{)}$$

-Para la determinación de humedad del suelo:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{peso del suelo} + \text{H}_2\text{O} - \text{peso del suelo a la estufa}}{\text{peso del suelo a la estufa}} \times 100$$

DENSIDAD REAL (*Método del picnómetro*)

MATERIAL:

-
- | | |
|--------------------|----------------------|
| • Picnómetro 50 mL | • Piceta |
| • Embudo | • Balanza granataria |
-

MÉTODO:

1. Pesar el picnómetro, cuidando que el número del tapón corresponda al número del picnómetro y anotar su peso.
2. Agregar 5 g de suelo¹ empleando un embudo y pesar.
3. Agregar una tercera parte de agua destilada con la piceta, cuidando de no mojar el picnómetro por fuera.
4. Aplicar un movimiento de rotación suave, para desalojar el aire.
5. Dejar reposar 30 minutos y desplazar las burbujas de aire hasta observar que no haya quedado ninguna.
6. Llenar el picnómetro, cuidando que quede lleno el capilar del tapón, secar con papel filtro o con un lienzo de lino.
7. Pesar el picnómetro con suelo y agua.
8. Lavar el picnómetro, dejarlo secar en la estufa 2 horas y sacarlo, enfriarlo en un desecador y llenarlo con agua destilada y pesarlo.

CÁLCULOS:

Para determinar la densidad real del suelo, se emplea la siguiente ecuación:

$$Dr = \frac{S}{(S+A) - (s+a)} \quad (\text{g/ml})$$

Donde:

S = Peso del suelo (g)

A = Peso del agua (g)

s+a = Peso del suelo y el agua mezclados (g)

¹ Cuando los suelos contienen mucha materia orgánica, se dejan reposar de un día para otro; o bien pueden colocarse en baño María hasta que se desprendan las burbujas, secar y enfriar.

POROSIDAD:

Para estimar el porcentaje del espacio poroso existente en las muestras de suelo, se emplea la fórmula siguiente:

$$\%P = (1 - D_a / D_r) 100$$

Donde:

%P = Porcentaje de espacio poroso.

D_a = Densidad aparente (g/mL).

D_r = Densidad real (g/mL).

ESTABILIDAD DE AGREGADOS (*Método Yoder*)

MATERIAL:

-
- | | |
|-------------------------|---------------|
| • Aparato Yoder | • Ultrasonido |
| • Cápsulas de porcelana | • Estufa |
| • Agua destilada | • Picetas |
-

MÉTODO:

1. Tomar una muestra de 250 g (aproximadamente) con la ayuda de un tubo de PVC del horizonte superficial.
2. La muestra recolectada a humedad de campo se pasa por un tamiz de 8 mm, eliminando gravas, piedras y hojarasca. Cuidadosamente se fraccionan los agregados mayores a 8 mm hasta que pasen por el tamiz.
3. Las muestras tamizadas se dejan secar a temperatura ambiente.
4. Se pesan 100 g tomando una muestra representativa.
5. Colocar en orden descendente un juego de 5 tamices (4.75, 2.00, 1.00, 0.50 y 0.25 mm) en el aparato Yoder. El nivel del agua debe cubrir la base del tamiz superior cuando este esté en su nivel más alto.

6. Distribuir homogéneamente los 100 g de suelo sobre el tamiz superior instalado en el equipo Yoder. Humedecer la superficie de los agregados con un aspersor con agua destilada para evitar que se revienten al ser mojados bruscamente.
7. Poner a funcionar el equipo Yoder durante 10 minutos. Y retirar de inmediato los tamices.
8. Retirar los agregados del suelo de cada tamiz con la ayuda de una piceta y recogerlos en cápsulas grandes de porcelana dejándolos sedimentar.
9. Después de sedimentar, se desecha el exceso de agua y se pasan a cápsulas de porcelana de menor tamaño, mismas que se ponen a secar durante 24 horas en la estufa a 105 °C.
10. Retirar de la estufa para enfriar a temperatura ambiente y pesar. Restar el peso de la cápsula de cada muestra y guardar en bolsas donde se anota su clave y tamaño de tamiz.

Eliminación de arenas

1. Cada muestra se coloca en un frasco de vidrio, se la agregan 200 mL de agua común y se coloca en un ultrasonido durante 5 minutos.
2. La muestra ya dispersa se pasa a través del mismo tamaño de tamiz que el utilizado en el equipo Yoder y se recoge en una cápsula grande dejando sedimentar y desechando el exceso de agua. Pasar a una cápsula de menor tamaño, los residuos que quedan sobre el tamiz son aquellas partículas que no pudieron dispersarse; éstas y las partículas flotantes (orgánicas) se desechan.
3. Después de sedimentar, se seca en la estufa a 105 °C durante 24 horas. Pesar y realizar los cálculos para determinar el peso de las arenas.

Cálculos.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
# Muestra	# Cápsula	Peso de la cápsula	Cápsula + Agregado + Arena	Cápsula + Arena	Arena Columna 5 (-) Columna 3	Agregado Columna 4 (-) Columna 5	Tamaños de Tamiz	Resultados

pH (Método en agua)

MATERIAL	REACTIVOS
• Potenciómetro	• Buffer pH 4
• Piceta	• Buffer pH 7
• Recipientes	• Agua destilada

MÉTODO:

1. Pesar 10 g de suelo.
2. Depositarlos en un recipiente de plástico.
3. Agregar al recipiente con suelo 50 mL de agua destilada y tapar.
4. Colocar los recipientes en un agitador mecánico de movimiento oscilatorio durante 30 minutos y dejar reposar hasta que las muestras sedimenten.
5. Calibrar el potenciómetro con buffer solución patrón de pH 7 y pH 4 a la misma temperatura.
6. Leer al sumergir el electrodo en un recipiente y dejar que la pantalla se mantenga constante.

Nota: es necesario lavar y secar el electrodo al término de la lectura de cada muestra y se vuelve a calibrar el potenciómetro cada 10 muestras con la solución patrón de pH 7 y pH 4.

MATERIA ORGÁNICA (Walkley y Black, 1947)

MATERIAL:

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| • Matraces Erlenmeyer de 250 mL | • Probeta graduada de 10 mL |
| • Buretas de 500 mL | • Balanza granataria |

MÉTODO:

1. Pesar 0.5 g de suelo⁺ (si es muy oscuro pesar 0.2g).
2. Colocar la muestra de suelo en un matraz erlenmeyer de 250 mL.
3. Agregar con una bureta 5 mL de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_4$) 1N.

⁺ Se deben preparar 2 BLANCOS, para la normalidad del sulfato ferroso (seguir los pasos del 3 al 9 sin dejar reposar).

4. Medir 10 mL de ácido sulfúrico concentrado (con una probeta ó con una bureta) y agregarlo lentamente, resbalando por las paredes del matraz).
5. Agitar durante 1 minuto y dejar reposar 30 minutos.
6. Agregar 100 mL de agua destilada.
7. Adicionar 5 mL de ácido fosfórico.
8. Agregar 5 gotas de indicador bariosulfonato de difenilamina.
9. Titular con sulfato ferroso (FeSO_4); 0.5N (el vire es verde esmeralda).

CÁLCULOS:

$$\% \text{ de M.O.} = \frac{5 - (\text{mL de } \text{FeSO}_4 \text{ (N real)}) 0.69}{\text{peso de la muestra (g)}}$$

Donde:

5 = Cantidad de dicromato de potasio agregado.

N = Normalidad real del FeSO_4

0.69 = Constante (ver análisis químico del suelo de Jackson)

$$\text{N real} = \frac{10 (0.5)}{\text{mL de } \text{FeSO}_4 \text{ (gastados en el blanco)}}$$

Donde:

10 = Volumen teórico del FeSO_4 , utilizado en el blanco.

0.5 = Normalidad teórica del FeSO_4

Para determinar el porcentaje de carbono⁺⁺:

$$\% \text{ C} = \% \text{ M.O.} / 1.724^{**} \quad \text{ó} \quad \% \text{ C} = \% \text{ M.O.} (0.58)$$

⁺⁺ El 1.724 corresponde a una constante de Jackson pag: 283.

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (*Método para suelos ácidos y neutros*)

MATERIAL	REACTIVOS
• Balanza analítica • Tubos para centrifuga • Matraces Erlenmeyer • Centrifuga • Pipetas • Bureta de 30 y/o 50 mL • Agitadores de vidrio	• Cloruro de sodio 1N; pH 7 • Cloruro de calcio 1N; pH 7 • Alcohol etílico 96% • EDTA 0.02N • Solución buffer pH 10 • Clorhidrato de hidroxilamina • KCN al 2% • Negro de eriocromo T

MÉTODO:

1. Pesar 1g de suelo y colocarlo en un tubo de centrifuga.
2. Agregar 5 mL ($\frac{1}{2}$ tubo) de cloruro de calcio 1N; pH 7 y mezclar con un agitador de vidrio.
3. Agregar otros 5 mL de cloruro de calcio con una piceta lavando el agitador y cuidando que el tubo no quede demasiado lleno.
4. Centrifugar durante 5 minutos a 3,000 rpm y decantar (*se desecha*)
5. Volver a centrifugar, decantar y desechar durante 5 veces.
6. Agregar 5 veces alcohol etílico, centrifugar y desechar.
7. Centrifugar 5 veces con cloruro de sodio y guardar para titular por el método del Versenato (EDTA).

Método del Versenato (EDTA).

1. Agregar 5 mL de solución buffer pH 10 (*con una probeta*).
2. Agregar 5 gotas de clorhidrato de hidroxilamina.
3. Agregar 5 gotas de KCN al 2%.
4. Agregar 5 gotas de negro de eriocromo T.
5. Titular con Versenato (EDTA) 0.02 N hasta que VIRE DE PÚRPURA A AZUL.

CÁLCULOS:

$$\text{CIC} = \frac{5 \text{ mL alicuota (mL de EDTA gastados)} \times N \times 100}{\text{g de la muestra}}$$

Donde:

N = Normalidad real del EDTA

Para determinar la normalidad real del versenato, se preparan 2 blancos con una solución de cloruro de calcio 0.02 N.

$$N_{\text{real}} = \frac{V_t \times N_t}{V_{\text{real}}} = \frac{10 \times 0.02}{\text{gasto del EDTA (del blanco)}}$$

Donde:

V_t = Volumen teórico

N_t = Normalidad teórica

V_{real} = Volumen real.

DETERMINACIÓN DE Ca^{++} y Mg^{++} (Método)

MATERIAL	REACTIVOS
• Balanza analítica	• Carbón activado
• Tubos para centrífuga	• Acetato de amonio
• Vasos de precipitado	• Solución Buffer pH 10
• Embudos	• Versenato EDTA 0.02N
• Pipetas	• Murexida
• Bureta de 30 y/o 50 mL	• Clorhidrato de hidroxilamina
• Flamómetro	• KCN al 2%
• Papel filtro # 40	• Negro de eriocromo T
• Picetas	• NaOH al 5%
	• CaCl_2 0.02N para valorar EDTA

MÉTODO:

1. Pesar 1 g de suelo.
2. Colocarlo en un tubo de centrifuga.
3. Agregar 5 mL De acetato de amonio 1N pH 7 y mezclar con un agitador de vidrio.
4. Agregar otros 5 mL de acetato de amonio.
5. Centrifugar durante 5 minutos a 3,000 rpm.
6. Decantar el sobrenadante en un frasco.
7. Repetir 5 veces el centrifugado y el decantado.
8. Filtrar con papel Watman # 40.
9. Vaciar en un matraz aforado de 50 ml y aforar .
10. Titular Ca^{++} y Mg^{++} .

Para Mg^{++}

1. Tomar 10 mL del filtrado.
2. Agregar 10 mL de solución buffer pH 10.
3. Agregar 5 gotas de KCN al 2%.
4. Agregar 5 gotas de Clorhidrato de hidroxilamina.
5. Agregar 5 gotas de Negro de eriocromo T.
6. Titular con EDTA (versenato) hasta que vire de púrpura a azul.

Para Ca^{++}

1. Tomar 10 mL del filtrado.
2. Agregar 5 mL NaOH al 5%.
3. Agregar murexida como indicador.
4. Titular con EDTA (versenato) hasta que vire de rosa a lila.

CÁLCULOS.

$$\text{Mg}^{++} = \frac{\text{mL de EDTA} \times 5 \times \text{N real}}{\text{g de la muestra}} \times 100 = \text{meq/100 g de suelo}$$

$$\text{Ca}^{++} = \frac{\text{mL de EDTA} \times 5 \times \text{N real}}{\text{g de la muestra}} \times 100 = \text{meq/100 g de suelo}$$

5 = se multiplica por 5 ya que se tomaron 10 mL de un total de 50 mL del filtrado ($50/10=5$)

N= normalidad del versenato (para encontrar la N real del EDTA se hacen dos blancos con una solución de cloruro de calcio 0.02 N) se utiliza como indicador negro de eriocromo.

$$N \text{ real} = \frac{V_t \times N_t}{V \text{ real}} = \frac{10 \times 0.02}{\text{gasto del EDTA (del blanco)}}$$

Donde:

V_t = Volumen teórico

N_t = Normalidad teórica

$V \text{ real}$ = Volumen real.

DETERMINACIÓN DE K^+ y Na^+ INTERCAMBIABLES

La determinación del sodio y del potasio intercambiables se hizo en el filtrado restante del centrifugado para Ca^{++} y Mg^{++} y fue leído por flamometría con la curva correspondiente (diluida en acetato de amonio).

Preparación de la solución madre para la curva patrón.

Se seco en la estufa a $110^\circ C$, NaCl, KCl y $CaCO_3$.

1. Pesar 0.1017 g de NaCl
2. 0.0763 g de KCL
3. 0.1250 g de $CaCO_3$
4. Se disolvieron en la menor cantidad posible de HCl 6 N (6 mL) y diluir a 1000 mL en un matraz aforado con agua destilada.

Preparación de la curva patrón

mL de solución Madre	mL de H ₂ O destilada	mL acetato de amonio	(mg/l.t.) ppm.
directa	-----	-----	40
75	25	25	30
	(aforar a 100)	(aforar a 100)	
50	50	50	20
	(aforar a 100)	(aforar a 100)	
25	75	75	10
	(aforar a 100)	(aforar a 100)	

Se grafico en papel milimétrico, eje X = concentración en ppm. Eje Y = lecturas en % de transmitancia. Reportar en meq/100 g de suelo.

FOSFORO (*Método Bray y Kurtz, 1945*)

MATERIAL	REACTIVOS
• Colorímetro	• Floruro de amonio (NH ₄ F)
• Tubos de ensaye	• Ácido clorhídrico (HCl)
• Picetas	• Molibdato de amonio
• Papel filtro	• Cloruro estañoso (SnCl ₁₂ ·2H ₂ O)
• Pipetas	• Fosfato de potasio monobásico (KH ₂ PO ₄)

MÉTODO:

1. Colocar en un tubo de ensaye de 15 mL 1 g de suelo, agregar 7 mL de solución extractora y agitar la mezcla durante un minuto, filtrese con papel filtro # 42.
2. Preparar un blanco, con 7 mL de agua destilada y todos los reactivos señalados en el inciso # 4, este blanco sirve para calibrar el colorímetro a 100% de transmitancia para cada una de las muestras.

3. El colorímetro deberá calentarse 15 minutos antes de realizar las lecturas y se ajusta a una lectura de 660 milimicrones de longitud de onda. Tomar 1 mL del filtrado y colocarlo en un tubo de ensaye, agregar 6 mL de agua destilada, 2 mL de molibdato de amonio, mezclar perfectamente y agregar 1 mL de cloruro estañoso diluido, agitar con cuidado y esperar 10 minutos a que aparezca un color azul. Leer en el colorímetro antes de que pasen 20 minutos.
4. Tomar de la solución de tipo fosfato de 10 hasta 1 mL sucesivamente y aforar cada toma a 100 mL de esta forma se obtienen de 10 a 1 ppm respectivamente.
5. Tomar de las diluciones anteriores 1 mL de cada una y colocarlas en un tubo de ensaye, agregar 6 mL de agua destilada 2 mL de molibdato de amonio, 1 mL de cloruro estañoso diluido, mezclar y esperar 10 minutos. Leer en el colorímetro antes de que pasen 20 minutos.
6. Es probable que al realizar la extracción del fósforo la cantidad obtenida sea muy reducida y no se cuantifique adecuadamente con la curva propuesta, por lo que se sugiere tomar de la solución de tipo fosfato las siguientes cantidades: 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 y 4.0 mL aforando cada uno a 50 mL y proceder como en el punto núm. 4.

ANEXO 2

ESTADÍSTICA DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS



Datos de las propiedades físicas del suelo para las dos áreas de estudio.

	TEXTURA			POROSIDAD	DENSIDAD		HUMEDAD	AGREGADOS					FÓSFORO
	ARCILLAS	LIMOS	ARENAS		APARENTE	REAL		>4.75	2.00-4.75	2.00-1.00	1.00-0.5	0.5-0.25	
MALINCHE / NO-QUEMADO			%			g/cm ³			%				PPM
0-3 Cauce	3.67	28.13	67.95	51.38	0.78	1.63	35.15	3.09	9.89	4.17	4.68	3.53	8.0
0-3 Dorso de ladera	2.90	23.72	72.46	50.52	0.83	1.69	33.41	5.97	9.93	4.58	3.98	2.09	11.5
0-3 Superficie cumbral	1.75	34.97	62.90	57.55	0.67	1.64	38.88	13.73	10.79	3.19	2.80	2.41	11.8
MALINCHE / QUEMADO													
0-3 Cauce	5.44	28.53	64.94	46.17	0.83	1.54	36.02	17.10	12.16	3.38	2.94	1.90	7.7
0-3 Dorso de ladera	1.67	23.11	75.08	49.84	0.72	1.44	43.08	5.08	9.36	3.12	3.25	2.53	7.9
0-3 Superficie cumbral	1.79	32.65	64.74	17.03	0.93	1.14	25.78	1.06	5.77	3.43	3.46	2.59	6.2
EL PELADO / NO-QUEMADO													
0-3 Cauce	7.60	37.43	54.67	61.40	0.57	1.46	79.42	4.78	8.47	3.51	3.08	2.02	10.3
0-3 Dorso de ladera	6.08	31.23	61.76	57.01	0.62	1.47	74.46	6.64	11.76	5.81	6.20	3.75	11.2
0-3 Superficie cumbral	10.03	38.36	51.23	46.90	0.62	1.19	84.31	4.88	9.05	3.72	4.37	1.85	11.3
EL PELADO / QUEMADO													
0-3 Cauce	7.71	40.38	51.74	30.74	0.67	1.01	76.29	4.48	9.96	5.23	8.06	2.85	10.1
0-3 Dorso de ladera	9.82	36.48	53.16	48.00	0.64	1.33	82.74	2.62	7.45	3.39	4.17	2.79	11.4
0-3 Superficie cumbral	6.95	37.99	55.00	44.45	0.70	1.28	66.18	2.62	8.24	4.24	5.35	4.02	10.5