



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**RELACIONES FUNCIONALES RELIEVE-SUELOS
EN EL VOLCÁN TLÁLOC, MILPA ALTA,
DISTRITO FEDERAL**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN GEOGRAFÍA
P R E S E N T A:
MARINA FERREIRA OCAÑA

DIRECTORA DE TESIS:

M. EN C. MA. DE LOURDES RODRÍGUEZ GAMIÑO

CO-DIRECTOR: DR. JORGE LÓPEZ BLANCO



MÉXICO, D. F.

AGOSTO, 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis seres queridos.

*A mi papá: **Ángel Ferreira Hernández** (mi papito con mucho cariño).*

*A mi mamá: **Ma. Eugenia Ocaña Arciniéga** (por su comprensión).*

*A mis hermanas: **Angélica Fabiola, Maricela e Irlanda**, con cariño.*

*A mis sobrinos: **Juan Ángel y Azul**, que con su ternura han llenado mi vida.*

*Al futuro geógrafo: **Hermes David Valdez Quiroz**, que con su entusiasmo y sabiduría he
descubierto a mi alma gemela*

*A mis amigos de la carrera: **Carolina, Ana[†], Soledad, Ismael, Eduardo y
Aldebarán.***

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente a la Facultad de Filosofía y Letras y al Colegio de Geografía, por darme la oportunidad de estudiar una Licenciatura.

A la M. en C. María de Lourdes Rodríguez Gamiño por su tiempo, amistad, apoyo, paciencia y dirección para la realización de este trabajo.

Al Dr. Jorge López Blanco por ser co-director de esta tesis, por su compromiso y respaldo en mi desarrollo a lo largo de este trabajo.

Muy especialmente al Dr. Gilberto Vela Correa por su disposición para el trabajo de campo y de laboratorio, sobre todo por ser ejemplo de dedicación y profesionalismo de la investigación en suelos.

Al M. en C. Sergio Yussim Guarneros y al Lic. Pedro Montes Cruz, gracias por sus valiosos comentarios y sobresalientes aportaciones.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) por el apoyo otorgado al proyecto IN 102503-3. Determinación y Aplicación de Indicadores Ambientales a escala detallada para la Evaluación Biofísica y la Planeación del Territorio: El caso de Milpa Alta, Distrito Federal y al Proyecto IN-114807-3. Indicadores para el Desarrollo Sustentable de la Sierra Chichinautzin de Importancia Ambiental para la Zona Metropolitana del Valle de México.

A las autoridades del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, por el uso de las instalaciones y espacios de estudio.

Al Laboratorio de Edafología del Departamento del Hombre y su Ambiente de la UAM-X, por las facilidades proporcionadas para el desarrollo del presente trabajo.

Al Biólogo y amigo, Armando Navarrete Segueda por sus comentarios que alimentaron este trabajo.

A mis amigos del área común y del cubículo 32: Lulú, Mónica, Liz, Virginia y Pedro.

Al Sr. Felipe Flores Jiménez por su apoyo brindado en el trabajo de campo

Por otra parte quiero agradecer a la Familia Valdez Quiroz, porque siempre mantuvieron las puertas abiertas de su hogar, especialmente a: la Sra. Leonor Quiroz y Alejandra Valdez Quiroz

Un agradecimiento más a la Sra. Gabriela Torres por su apoyo

Agradezco a la Representación de Bienes Comunes de Milpa Alta por las facilidades brindadas para llevar a cabo el trabajo de campo.

A los profesores: Jorge Caire, Francisco Hernández, Arturo Iturbe, Rafael Costero, Jaime Morales y Genaro Correa. Por ser parte fundamental de mi desarrollo profesional.

*Dios es lo bastante justo
como para saber que el problema
no es una cuestión de fe y lógica,
sino de cómo se vive la vida.*

No somos tontos, solo pobres.

Orhan Pamuk, 2006

ÍNDICE

Resumen	1
----------------	---

Introducción	2
---------------------	---

CAPÍTULO 1. Marco geográfico

1.1 Localización del área de estudio	8
1.2 Geología	9
1.3 Clima	15
1.4 Hidrología	16
1.5 Edafología	16
1.6 Vegetación	19
1.7 Aspectos socioeconómicos	19

CAPÍTULO 2. Marco teórico-conceptual

2.1 Teoría general de los sistemas y la geomorfología	22
2.2 Geomorfología Funcional	24
2.3 Relaciones causales y funcionales	24
2.4 El sistema del suelo	25
2.5 Geomorfología-Edafología	27
2.6 Conceptos geomorfo-edafológicos	28
2.7 Procesos en una ladera	31
2.8 Aplicación de enfoques, modelos y paradigmas	35
2.9 Materiales volcánicos	38

CAPÍTULO 3. Metodología

3.1 Mapeo geomorfológico	40
3.2 Delimitación del área de estudio	40
3.3 Delimitación de las unidades geomorfológico-morfogenéticas (UGM)	42
3.4 Clasificación de las UGM	43
3.5 Procesamiento en SIG de las UGM	44
3.6 Elección de los sitios de muestreo	45
3.7 Muestreo de campo	46
3.8 Análisis de laboratorio	46
3.9 Análisis estadístico multivariado	47

CAPÍTULO 4. Resultados

4.1 Descripción de las UGM	49
4.1.1 Grupo de laderas de montaña	49
4.1.2 Grupo de piedemontes	53
4.1.3 Grupo de planicies	56
4.2 Descripción morfológica, propiedades físicas y químicas de los perfiles de suelo	57
4.2.1 Perfil 1. Volcán Tláloc	60
4.2.2 Perfil 2. Tláloc	64
4.2.3 Perfil 3. Volcán Xistune	66
4.2.4 Perfil 4. Villa Milpa Alta	69
4.2.5 Perfil 5. Volcán San Miguel	73
4.2.6 Perfil 6. Santa Ana Tlacotenco	75
4.2.7 Perfil 7. Milpa Alta	77
4.3 Análisis estadístico	81

CAPÍTULO 5. Discusión

Conclusiones	95
---------------------	----

Bibliografía	97
---------------------	----

Resumen

El objetivo de este trabajo fue establecer las relaciones funcionales relieve-suelo en la ladera norte del Volcán Tláloc, Milpa Alta, Distrito Federal, considerando como fuentes de variación las distintas posiciones de la ladera y las propiedades físicas y químicas de los suelos. Mediante la fotointerpretación y el trabajo de campo se definieron subgrupos de unidades de relieve, utilizando un criterio morfogenético que sirvió de base para definir los sitios de muestreo. Se describieron siete perfiles de suelo y en laboratorio se determinaron once de sus propiedades físico-químicas. Las unidades geomorfológico-morfogenéticas (UGM) son de origen endógeno volcánico y exógeno, acumulativas y se clasificaron en los subgrupos de: laderas de montaña de cono de escoria de andesita holocénica (*Lmce*), laderas de montaña de flujos lávicos de andesita holocénica (*Lmfl*), piedemonte complejo de flujos lávicos cubierto de aluvión reciente pleisto-holocénico (*Pmc*) y planicie aluvial acumulativa (*Pal*) de depósitos no consolidados como ceniza volcánica sobre andesita pleistocénica. La profundidad del suelo en los sitios de *Lmce*, *Lmfl* y *Pmc* fue >1m y en la *Pal* fue de 0.7 m atribuible a factores como la altitud y el clima. Los sitios de la *Lmce* y *Lmfl* presentan una textura migajón-arenosa y en los sitios de *Pmc* y *Pal* la textura es areno-migajosa y arenosa. En los sitios de *Lmce* y *Lmfl*, el pH resultó ser de ácido a ligeramente ácido, en cambio en los sitios de *Pmc* y *Pal* el pH es neutro. El alto contenido de MO se presentó en los horizontes superficiales de los subgrupos de *Lmce* y *Lmfl*, a diferencia de los sitios de *Pmc* y *Pal*, donde es pobre debido a la actividad agrícola. La CIC es alta en las *Lmce* y *Lmfl*, media en el *Pmc* y baja en la *Pal*. Debido a la temporalidad de las distintas posiciones del relieve se encontraron diferencias importantes en las propiedades del suelo, donde los materiales de las *Lmce* y *Lmfl* son más recientes (Holoceno) en comparación con los de *Pmc* y la *Pal* del Pleistoceno. La interpretación de las relaciones funcionales relieve y suelo proporcionan información para un futuro estudio en el contexto de otras disciplinas.

Introducción

El relieve es uno de los factores que influye en las propiedades de los suelos, de manera que, la inclinación y la orientación afectan el contenido de humedad a lo largo de la ladera. Esta cercana dependencia que guarda el relieve con el suelo, es primordial en el entendimiento de sus propiedades físico-químicas. Numerosos trabajos han mostrado que la mayoría de las propiedades de los suelos están relacionadas con la pendiente, la altitud, así como con la posición particular que ocupan dentro de la ladera. Entre estos Stone *et al.* (1985) y Galicia *et al.* (1995), mencionan que los piedemontes tienen mayor contenido en materia orgánica y nutrimentos que los dorsos o las superficies cumbrales.

Este trabajo contribuye al entendimiento del relieve y su relación funcional con los suelos, desde la perspectiva de la geomorfología. Se parte del supuesto de que la utilización del mapeo geomorfológico, a escala detallada, proporciona información útil para inferir las propiedades de los suelos. A partir de una clasificación morfogenética de las formas del relieve, es decir, de sus aspectos fundamentales como el origen, el tipo, la edad/litología y la geometría, donde el efecto de la escala de los procesos geomorfológicos (por ejemplo, los flujos de agua, la erosión y la depositación) modifican la estructura y distribución de los suelos.

Una catena es una secuencia simultánea y ordenada pendiente abajo en un sistema de ladera, está compuesta por tres elementos topográficos esenciales (superficie cumbrales, dorso de ladera y piedeladera), en los cuales se generan procesos geomorfológicos y edáficos particulares: a) la zona eluvial, que topográficamente se localiza en la porción más alta, b) la zona coluvial, topográficamente se localiza en el dorso de la ladera, presenta un marcado ángulo de inclinación y es típicamente la zona de transporte, y c) la zona aluvial, topográficamente pertenece al pie de la ladera, presenta una morfología plana y es la zona de depositación (Gerrard, 1992; Birkerland, 1999).

Partiendo del hecho de que los suelos son una parte integral de las formas del relieve, algunos procesos que ocurren en el relieve tienen mucha importancia para explicar los procesos que

ocurren en los suelos, de manera que el desarrollo del relieve determina cuándo comenzaron o cuándo cesaron ciertos procesos del suelo, asimismo, la actividad tectónica y la variación litológica pueden producir paisajes geomorfológicos que en ciertas condiciones pueden ser confundidos con superficies de erosión, por lo que se considera que el desarrollo del suelo no comienza con la erosión o la depositación de materiales edáficos, sino hasta que el suelo alcanza un estado de equilibrio; a través del clima, la vegetación, el intemperismo del material parental y sobre todo del tiempo. De esta manera el suelo en una superficie geomorfológica es más joven que el material del cual se está formando y más joven aún que la superficie en la cual se está desarrollando (Hall, 1983).

Considerando lo anterior, resulta importante identificar que las superficies geomorfológicas relativamente más estables (en el tiempo), así como los procesos a corto plazo y los cambios ambientales, que tienen un efecto sensible dentro de la duración de la vida humana o de unas generaciones, deberían recibir atención particular (Tricart, 1982). Se ha estudiado que el cambio del balance entre erosión e intemperismo en un sistema de ladera es atribuido a las condiciones climáticas, al uso de suelo o a eventos catastróficos que pueden afectar el desarrollo unidireccional esperado bajo el concepto de catena (Krasilnikov *et al.*, 2005).

Funcionalmente, el desarrollo del suelo depende del clima, los organismos, el material parental, el relieve y el tiempo, sin embargo, para esta investigación se consideró la relación que guarda el relieve con el suelo, a partir de un enfoque geomorfológico-funcional, como parte de la investigación sistemática del relieve. La cual establece que en función de un proceso, forma o características particulares de litología y suelos, está la magnitud del efecto o resultado de que dicha organización funcional del paisaje geomorfológico da respuesta a factores físico-químicos, los cuales pueden estar canalizados por la actividad biótica, especialmente por la actividad humana. No obstante, la pendiente ha sido considerada como uno de los factores abióticos que controlan los procesos pedogenéticos a una escala local (Tsui *et al.*, 2004).

Por otra parte, los suelos se diferencian generalmente de los depósitos geológicos que les dieron origen. Los suelos desarrollados a partir de depósitos piroclásticos y otros materiales

volcánicos, ocupan aproximadamente el 0.8% de la superficie terrestre (Leamy, 1984). La mayoría del material parental volcánico es fino, productivo y muestra una pequeña resistencia al intemperismo (Daniels y Hammer, 1992). Para numerosos habitantes en muchas regiones de México, estos suelos son considerados como un importante recurso natural, posiblemente dos de las terceras partes del país poseen estos suelos (Peña, 1980). En la Delegación Milpa Alta son muy abundantes, se siembra en ellos nopal, maíz, avena, entre otros cultivos (INEGI, 2001).

La variabilidad de las características físicas y químicas de los suelos y su relación con el relieve ha sido ampliamente estudiada en las zonas templadas (Gerrard, 1992; Birkeland, 2003), y tropicales (Tsui *et al.*, 2004). Los autores coinciden en que los suelos pueden proveer información útil para la interpretación geomorfológica de terrenos montañosos, es decir, la importancia del suelo como un factor para estimar condiciones ambientales en el pasado a través de la exploración de perfiles de suelo, variables climáticas, tipos de vegetación y características de relieve. Sin embargo, existen muy pocos modelos de la integración geomorfo-edafológica en el país. Una excepción es el trabajo de Galicia *et al.* (1999) en Chamela, Jalisco y Krasilnikov *et al.* (2005), en la Sierra Madre del Sur, Oaxaca, donde el arreglo espacial de los suelos en las montañas es atribuido a los procesos geomorfológicos. De acuerdo con lo anterior, la finalidad del presente trabajo es generar información que sirva como base para la toma de decisiones en la elaboración de planes de desarrollo rural, programas de manejo de recursos naturales en áreas forestales y planes de conservación de suelo en áreas agrícolas.

Objetivo general

- Establecer las relaciones funcionales relieve-suelos, tomando como fuente de variación las distintas posiciones de la ladera y sus diferencias en cuanto a propiedades físicas y químicas de los suelos en el volcán Tláloc, Milpa Alta, Distrito Federal,

Objetivos particulares

- a) Delimitar las unidades geomorfológico-morfogenéticas (UGM) del área de estudio en fotografías aéreas a escala 1:20,000.
- b) Determinar las propiedades físicas y químicas de los suelos en los subgrupos de UGM que se presenten en la ladera norte del volcán Tláloc.
- c) Analizar e interpretar estadísticamente la relación funcional entre las propiedades físicas y químicas con respecto a las UGM.

Hipótesis de trabajo

Existen relaciones funcionales directas y bidireccionales entre el relieve, la textura de los materiales, la intensidad de los procesos geomorfológicos, la profundidad del suelo, la geometría del relieve y la distribución de las propiedades físicas y químicas del suelo.

En los grupos de laderas de montaña, donde predominan los flujos lávicos, los suelos serán menos profundos, sin embargo en el piedemonte y en la planicie, donde se presentan procesos de acumulación, los suelos serán más profundos lo que influirá en su comportamiento físico y químico.

En los subgrupos de piedemonte y planicies se presentará un incremento de la densidad del suelo, debido a la depositación de materiales, provenientes del transporte de materiales de las laderas de montaña y la compactación del suelo, debido a las actividades agrícolas.

El contenido de materia orgánica es mayor en los suelos de las laderas de montaña debido a los aportes de la vegetación natural de bosque de pino, en comparación con los piedemontes y planicies, donde la vegetación natural es sustituida por agricultura de nopal, cultivo que no requiere de gran cantidad de nutrimentos.

Estructura del trabajo

Está conformado por cinco capítulos. El primer capítulo presenta un marco geográfico del área de estudio, compuesto en primer lugar por su localización y de manera general se muestra la geología regional y local, el clima, la hidrología, la edafología, la vegetación; por último, muy brevemente, un entendimiento social del área. De esta manera se observan las diferentes relaciones entre el relieve y los suelos, asociándolas a los demás fenómenos que ocurren a lo largo de la ladera.

El segundo capítulo muestra un marco teórico-conceptual de los aspectos que se necesitaron para abordar este estudio. Se describen los aspectos relacionados con la Teoría General de Sistemas y de Geomorfología, así como el enfoque Geomorfológico-Funcional y el Sistema del Suelo. También se muestran los conceptos geomorfo-edafológicos, que son una serie de conocimientos que implican una descripción exhaustiva de cada uno de ellos, su importancia para este estudio, así como sus aplicaciones.

El capítulo tercero está integrado por la metodología, donde se explican los pasos que se siguieron en la elaboración de los mapas dentro de un sistema de información geográfica a partir de un modelo digital del terreno (MDT), que permitió la generación de mapas altimétricos y de pendientes, así como de la delimitación de las unidades geomorfológico morfogenéticas (UGM) en las fotografías aéreas. Una vez delimitadas las UGM, se establecen los pasos que se siguieron en el trabajo de campo y de laboratorio para determinar las propiedades físicas y químicas de los suelos de los sitios muestreados. Por último, se explica cómo se llegó a establecer la relación funcional entre cada uno de los elementos del relieve y del suelo.

El cuarto capítulo presenta los resultados de la caracterización geomorfológica y de la morfología, propiedades físicas y químicas de los suelos, además del análisis estadístico multivariado. Se muestra el mapa de los subgrupos de UGM, clasificados a partir de los aspectos fundamentales del relieve y de las características de su ambiente biofísico. Se describe la morfología de cada uno de los siete perfiles y se muestran las tablas

correspondientes a los análisis físicos y químicos de los suelos. Por último, la información correspondiente al análisis estadístico, donde se presentan las tablas y figuras que generaron el análisis de componentes principales y de agrupamiento.

En el quinto capítulo se discuten las relaciones funcionales entre los subgrupos de UGM y las propiedades físicas y químicas de los perfiles de los suelos analizados, primero se estableció la relación entre las propiedades físicas y químicas con los subgrupos de laderas de montaña, piedemontes y planicies, para posteriormente establecer las relaciones entre cada subgrupo de UGM. Finalmente, se presentan las conclusiones de este trabajo.

Capítulo 1. Marco geográfico

1.1 Localización del área de estudio

Se localiza al sur de la Delegación Milpa Alta, en el Distrito Federal, específicamente en la ladera norte del Volcán Tláloc, que se encuentra entre las coordenadas extremas de los $19^{\circ}08'45''$ y $19^{\circ}04'11''$ de latitud norte y $99^{\circ}03'58''$ y $98^{\circ}58'02''$ de longitud oeste, con una elevación máxima de 3,690 msnm. Los límites de la ladera son, al norte con los poblados de Villa Milpa Alta, San Salvador Alto, Cuautenco, San Pablo Ostotepéc y San Lorenzo Tlacoyucan, al sur con el Estado de Morelos, al este con el Estado de México y al oeste con los Volcanes Cuautzin y Chichinautzin. La ladera norte cubre una superficie de 3,963 ha (en metros) y el intervalo de elevación va de los 2,300 m en el área de la planicie a los 3,690 m en las laderas de montaña externa del cono, con pendientes que van de los 0° a 35° respectivamente (Figura 1.1).

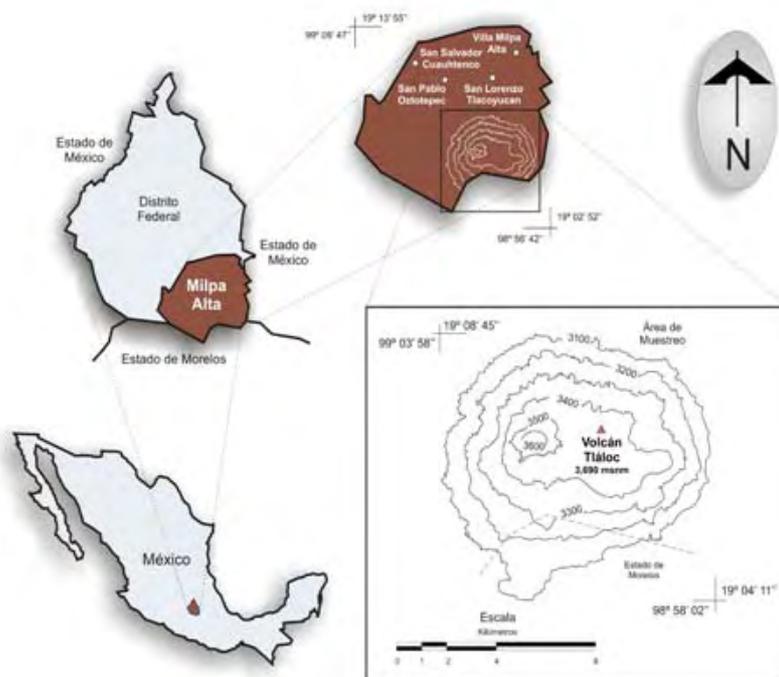


Figura 1.1 Localización del área de estudio.

1.2 Geología

La edad geológica del área de estudio pertenece al periodo Cuaternario de la Era Cenozoica. Fisiográficamente se localiza en la provincia del Eje Neovolcánico, subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac (INEGI, 1982b). La Formación Chichinautzin, considerando el vulcanismo Plio-Cuaternario, corresponde con el sector de los valles de Toluca, México y Puebla dentro de los cinco sectores en los que se ha subdividido la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) o Eje Neovolcánico, los valles son bordeados por altos estratovolcanes en sus límites, incluyendo un grupo extenso de conos cineríticos (González, 1992).

De manera general la FVTM es una franja volcánica continental formada como consecuencia de los procesos de subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa Norteamericana. Se extiende desde las costas del Pacífico hasta las del Golfo de México, aproximadamente entre los paralelos 19° y 21° de latitud norte; posee una longitud aproximada de 900 km de largo por 100 km de ancho en promedio; sus límites al norte son el Altiplano Mexicano y al sur la Sierra Madre del Sur. Desde el punto de vista geoquímico, la FVTM es una provincia de composición calco-alcalina que se caracteriza por la abundancia de dacitas y andesitas, aunque también presenta productos alcalinos subordinados (González, 1992).

Siebe *et al.* (2005), menciona que el Campo Volcánico de la Sierra Chichinautzin (CVSC), está localizado en la parte central de la FVTM, representa el límite sureste del drenaje que separa la parte sur de la Cuenca de México, de Cuernavaca y Cuautla.

Las múltiples estructuras volcánicas del CVSC están asociadas con el desarrollo de un patrón de fracturamiento con dirección E-W. La ocurrencia de sismos someros (<20 km de profundidad) de magnitud baja (<4 en la escala de Richter) durante las últimas décadas, indica que se trata de un área tectónicamente activa (Martin, 1980). El lineamiento de las fallas preferenciales es E-W, reconocidas como fallas normales buzando hacia el norte, que difícilmente son reconocidas por la presencia de la vegetación y los flujos lávicos recientes. Además representa la expresión tectónica de un *horst* cuya parte norte es un escalonamiento de fallas. Estas fallas de extensión profundas sirvieron como vías de ascenso a los frecuentes y pequeños lotes de magma que sucesivamente agregaron altitud al área (Arana, 2004).

La actividad volcánica de la FVTM ha dado lugar a un gran número de cuencas endorreicas, con el consecuente desarrollo de lagos (por ejemplo, Xochimilco y Texcoco), lo que da al paisaje geomorfológico una apariencia muy característica. Morfológicamente la FVTM consiste en una serie de planicies escalonadas desmembradas por volcanes aislados, pequeños grupos de volcanes desde el Mioceno al Cuaternario. Una particularidad de ésta faja, es la abundancia de conos de escoria y estructuras monogenéticas que superan en número a los grandes estratovolcanes (Siebe *et al.*, 1995).

La Cuenca de México, dentro de la FVTM, es una de las áreas que cuenta con abundancia de estudios geológicos, en donde se ha determinado que está conformada por un graben con una orientación N-S, en la cual se emplazaron tres ciclos de efusión ígnea a partir del Mioceno, que dieron lugar a su formación. El más reciente de estos ciclos ocurrió durante el Pleistoceno y originó la Sierra Chichinautzin, formando la barrera volcánica al sur de la cuenca que de acuerdo con Fries (1982 citado en Siebe *et al.*, 2005) drenaba hacia el sur, antes del Pleistoceno. Desde entonces la Formación Chichinautzin selló la cuenca hacia el sur, la cual está rodeada completamente por cadenas montañosas de origen volcánico. Estas sierras forman los límites de la Cuenca de México, misma que fue rellenada con sedimentos lacustres y cenizas volcánicas (González, 1992).

La actividad volcánica de la Sierra Chichinautzin comenzó con erupciones de actividad explosiva de rocas intermedias, del tipo estromboliano, concentrada en la porción central de la sierra (Martin, 1980), está estructurada principalmente por un campo extenso de volcanes monogenéticos, los cuales abarcan una región muy amplia entre la Ciudad de México y Cuernavaca. La Formación Chichinautzin comprende todos estos productos, siendo definida por Fries (1960 citado en González, 1992) como todas las corrientes lávicas, tobas, brechas y materiales clásticos interestratificados, depositados por agua, de composición andesítica o basáltica, que se encuentran encima de la Formación Cuernavaca o de unidades más antiguas. Originalmente esta unidad fue atribuida al Cuaternario, sin embargo, se encuentra interdigitada con las Formaciones Tarango y Atotonilco el Grande, por lo cual se estima que sus primeras erupciones tuvieron lugar en el Plioceno Tardío (González, 1992).

El CVSC tiene 220 volcanes monogenéticos (una de las más altas concentraciones dentro de la FVTM) (Siebe *et al.*, 2005), formado por conos de ceniza y escoria, así como por una secuencia de lavas y piroclastos de composición calco-alcalina. Las lavas son predominantemente andesitas, aunque también se presentan basaltos y dacitas en mucha menor proporción (González, 1992). Generalmente, los volcanes monogenéticos se presentan en depresiones tectónicas, sin embargo, la mayoría de los volcanes que conforman el CVSC se localizan en un prominente alto topográfico (Arana, 2004).

Con base en Lugo (1984) y Toscana (1998), en el caso de los conos volcánicos del sur de la Cuenca de México, los procesos morfogenéticos son de dos tipos: formas de relieve endógena y formas de relieve exógena. Las formas de origen endógeno son los volcanes (mono y poligenéticos), domos, coladas de lava y flujos piroclásticos y las formas de origen exógeno, se dividen en erosivas (circos de derrumbe, circos glaciales y circos de erosión) y acumulativas (morrenas y planicies o superficies residuales).

En la Formación Chichinautzin se presentan tres unidades geomorfológicas distinguibles: formas volcánicas recientes, relictos de la formación Tepoztlán y relieve de rocas sedimentarias. La actividad volcánica de la Sierra Chichinautzin ha originado formas muy diversas del relieve, tales como: laderas, depósitos piroclásticos retrabajados, conos cineríticos y anillos de tefra. Además ha producido formas no modeladas por procesos exógenos, como las coladas de lava y las brechas volcánicas, por lo que, el relieve es fundamentalmente volcánico (Martin, 1980, Ávila, 1998, González, 1998).

Los conos volcánicos de los alrededores del área de estudio ocupan pequeñas superficies de terreno. Los mayores son del orden de un kilómetro de diámetro, con alturas relativas de 150 a 250 m y con pendiente aproximada de 30°. La mayoría tiene en la cima un cráter cerrado o abierto en forma de herradura, además de que cada volcán principal es acompañado casi en todos los casos por uno o más secundarios (Martin, 1980). El relieve corresponde a los derrames de lava emplazados, mismos que se sobrepone unos con otros. Los derrames de lava, en la medida que son más antiguos, van perdiendo la morfología original del malpaís, debido a la nivelación que se produce por acumulación de sedimentos en las depresiones, por acarreo fluvial y por el viento. La actividad volcánica en la Sierra Chichinautzin supera la

velocidad de erosión, por lo que la evolución del relieve seguirá dependiendo del volcanismo (González, 1998).

El Volcán Tláloc junto con los volcanes Cuauhtzin, Hijo del Cuauhtzin y Ocusacayo se localizan en una de las partes topográficamente más altas, al centro-este del CVSC. La mayoría de sus lavas fluyeron hacia el norte (debido a que los centros de emisión se sitúan cercanos a la división del drenaje) y sólo algunas hacia el sur (Cuernavaca) (Arana, 2004).

El volcán Tláloc con una altitud de 3,690 m es una de las elevaciones más sobresalientes en la parte centro-este del CVSC. Es un cono de escoria de 170 m de altura relativa y un diámetro basal de 950 m. La cima principal del cono fue formada por la coalescencia de varios conos, cuya evidencia son los tres pequeños cráteres alineados en una dirección ESE-WNW a lo largo de una falla inferida. Este alineamiento ESE-WNW es consecuente al sistema de fracturas de la región de acuerdo con Martin, (1980), Arana (2004) y Siebe *et al.* (2005). El cono cinerítico consiste de un cono principal, Tláloc I, con un cono sobrepuesto más pequeño, Tláloc II y cuatro conos adventicios: Tláloc III, IV, V y VI.

Como la mayoría de los volcanes del CVSC, el Tláloc fue formado por erupciones de tipo estromboliano, en las cuales la ceniza, lapilli y bombas fueron expulsadas de una manera similar al Parícutín (Martin, 1980). Esos rasgos indican que los fragmentos de escoria fueron relativamente enfriados y emplazados hacia una columna volcánica relativamente alta. El Tláloc y sus lavas cubren un área de 54.4 km². El Tláloc es comparativamente joven con respecto a los volcanes Tlacotenco y Ocusacayo, con una edad de 6,200 años. Esta edad es consecuente con el grosor de los paleosuelos y datada a partir del método de ¹⁴C (Siebe, 2005).

Martin (1980) propuso una clasificación cronológica para diferenciar una unidad holocénica y cuatro unidades pleistocénicas de menos de 40,000 años (Hv, Plv₁, Plv₂, Plv₃ y Plv₄) a partir de análisis estratigráficos y de morfometría, define: la Unidad Morfoestratigráfica Volcanitas Holocénicas (Hv), la Unidad Morfoestratigráfica Volcanitas Pleistocénicas 1 (Plv₁) y la Unidad Morfoestratigráfica 3 (Plv₃) que corresponde al origen de los volcanes Xistunes I, II, III y IV y al Volcán San Miguel (Figura 1.2).

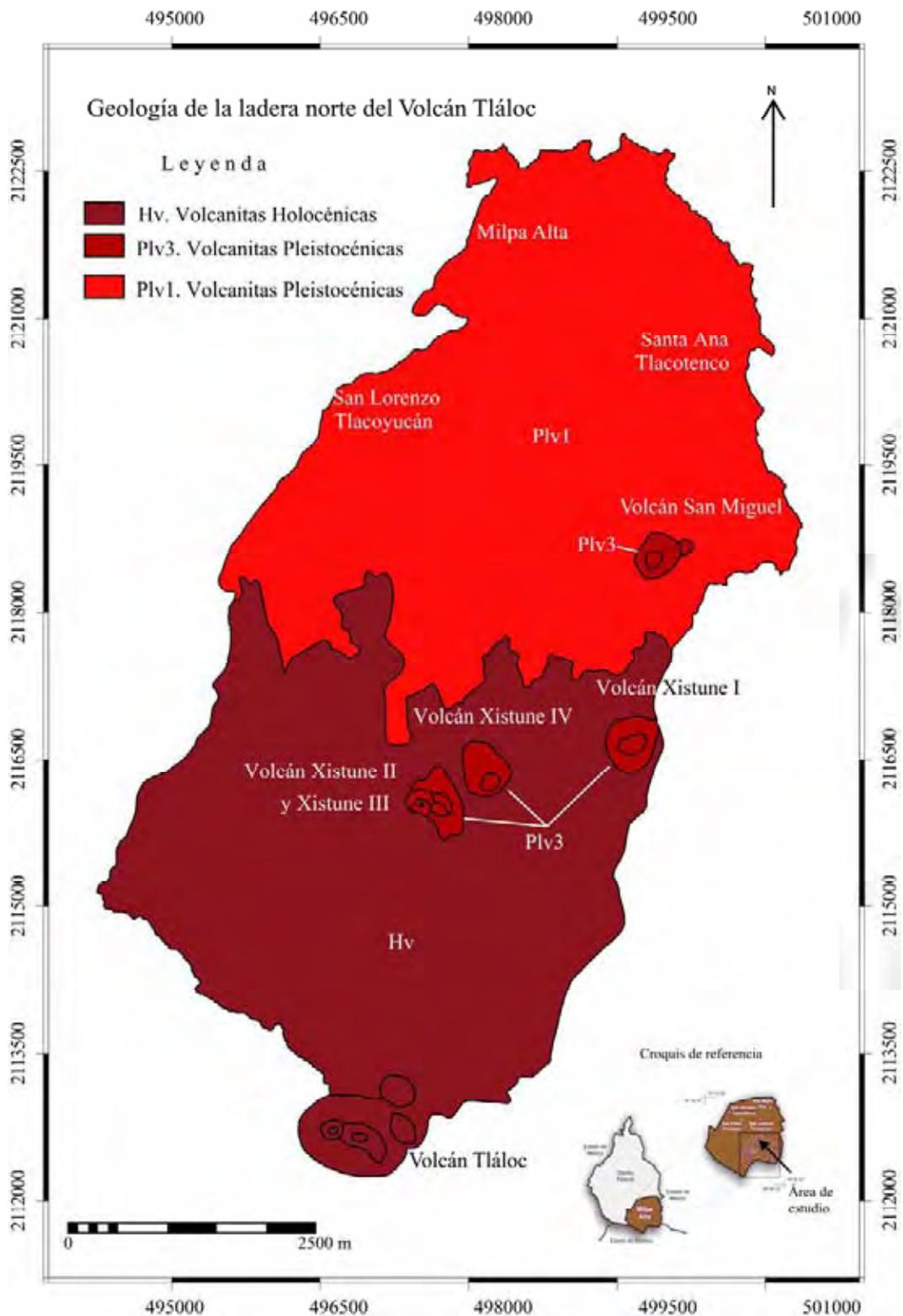


Figura 1.2 Geología de la ladera norte del volcán Tláloc, Milpa Alta (Martin, 1980).

La unidad Hv presenta las siguientes características geomorfológicas: a) Los derrames tienen una cubierta delgada de suelo con vegetación baja, pero no se encuentran cultivados (pedregal); b) Se preservan todas las estructuras de flujo y c) Las unidades de flujo individuales son cartografiables. Subdividió a esta unidad en dos sub-unidades; una que presenta características de la unidad Plv₄ y también de la unidad Hv, y otra que presenta características únicamente de la segunda y reporta edades entre 2.4 y 8.4 (ambas de +/- 0.7) miles de años.

La Plv₁ es la unidad más antigua del Grupo Chichinautzin con una edad de 38.6 +/- 3.2 miles de años y presenta los siguientes parámetros geomorfológicos: a) los márgenes de los derrames se encuentran redondeados, b) no se observan estructuras de flujo, c) existe una cubierta de suelo de menos de 4 m, encima de los derrames y d) el terreno desarrollado sobre la roca está intensamente cultivado (Martin, 1980).

La unidad Plv₃ tiene una edad de 21.8 +/- 0.3 miles de años, presenta los siguientes parámetros geomorfológicos: la cubierta de suelo no es persistente, todas las crestas de presión son visibles, los bordes de los derrames están muy marcados y se observa poca erosión hídrica en las crestas terminales.

Los derrames que son del tipo de bloque están compuestos por andesitas basálticas de olivino y augita. Por el norte las lavas llegan casi hasta Villa Milpa Alta, hacia el sur, cubren parcialmente los volcanes Pajonal, Ocotecat I y II, Teconzi, Ooloca y Teconzito; que descansan sobre lavas y cenizas de la unidad Plv₃. La parte oriental del volcán está cubierta por capas de 1 a 10 cm de ceniza gris, que alternan con capas de unos 3 cm de espesor de ceniza café más fina y por el poniente, hasta el Volcán Chichinautzin, descansan sobre 2 m de cenizas café de las planicies de Volcanitas pleistocénicas 1 (Plv₁) (Martin, 1980).

Los flujos de lava formaron la base de los conos, la mayoría de esos volcanes son conos adventicios. Dentro del área de estudio se localizan los volcanes Xistunes I, II, III y IV; son conos que en gran parte están cubiertos por lavas del Tláloc, se componen de escoria andesítica con hiperstena y augita. El Volcán San Miguel, que se localiza al norte de los volcanes Xistunes, tiene características muy similares a éstos, pero no lo llegan a cubrir las

lavas del Volcán Tláloc. Por último el Volcán San Miguel sobreyace a una planicie de cenizas (Plv₁) (Martin, 1980).

El Flujo Tlacotenco (3,450 m) se localiza al este del Tláloc. Tlacotenco, al parecer se originó por la misma fractura en donde se emplazó el Tláloc, sobre un relieve pre-existente rodeando un cono de escoria antiguo (Xistune) que desvió ligeramente. Tiene una longitud de 9.5 km y una anchura cercana a 1 km. De acuerdo con Arana (2004), la dacita Tláloc que compone estos flujos, es de color gris oscuro, denso y vesicular de una textura afanítica. Estos flujos de lava se encuentran sobre derrames de lava más antiguos, por lo que están cubiertos de los depósitos de caída del mismo volcán.

Arana (2004), mediante el estudio de un afloramiento del depósito de caída, de escoria, determinó que su espesor alcanza más de 2.8 m y presenta una coloración que varía de gris oscuro a verdoso. El depósito es laminado con gradación simétrica, y las laminaciones tienen espesores que varían entre 2 y 3 cm y están constituidas en un 60% por escoria color gris oscuro, 25% por pómez, de blanquecina a amarillenta, 5% por cristales de piroxeno y 10% por vidrio verdoso. El Tláloc presenta una variabilidad de composición en sus productos, que van de andesitas-basálticas hasta las dacitas. La erupción inició con productos menos saturados en sílice y culminó con lavas más ácidas. Los productos están constituidos por fenocristales de olivino, clinopiroxeno, ortopiroxeno, plagioclasa y hornblenda.

1.3 Clima

Los climas de la Sierra Chichinautzin varían de templados a muy fríos y de secos a húmedos (Ramos, (2000). Para el área de estudio y con los datos de la estación meteorológica Milpa Alta (con un periodo de 38 años), se estableció el clima Cb(w₁)w(i)g, es decir, templado subhúmedo con régimen de lluvias en verano, poca oscilación térmica y la marcha de la temperatura es de tipo Ganges. Con una temperatura media anual de 15.3°C y precipitación anual de 688 mm. Se presenta un verano fresco y largo, dentro de los subhúmedos es intermedio, la oscilación térmica se sitúa entre los 5 y 7° C, además de presentar el mes más caliente antes del solsticio de verano (en mayo) (García, 1998).

1.4 Hidrología

El Volcán Tláloc junto con el Pelado y el Chichinautzin, definen el drenaje de la Cuenca de México que divide en altitudes alrededor de los 3,700 m (Siebe *et al.*, 2005).

La Sierra Chichinautzín se constituye de rocas de origen volcánico, sumamente fracturadas, fragmentadas y de estructura porosa. Esto hace que el área sea muy permeable, por lo que solo predominan las infiltraciones y las corrientes temporales que se presentan con un patrón radial y paralelo (Ávila, 1998). Se ha desarrollado un verdadero sistema de drenaje superficial y las corrientes que podrían generarse debido a las fuertes precipitaciones, que caen en esta área, solamente producen arroyos de escasa importancia por su caudal y dimensiones (Hiroishi, 1974). La mayor parte de la lluvia se infiltra, constituyendo una zona de recarga acuífera importante (Martin, 1980). Al pie de las serranías se encuentran los afloramientos de los manantiales más caudalosos de la Cuenca de México (CHCVM, 1964).

Rodríguez (2001), definió la subcuenca del Río Milpa Alta, la cual nace en el Volcán Tláloc de la Sierra Chichinautzin, con un caudal insignificante, de régimen torrencial y volumen acuífero todo el año. El coeficiente de escurrimiento en esta subcuenca es muy bajo a lo largo del año, debido a las condiciones de la geología del área. Sin embargo, durante la época de lluvias este coeficiente de escurrimiento se eleva.

1.5 Edafología

De acuerdo con la clasificación de INEGI (1984c) y *World Reference Base*, FAO-ISRIC-ISSS, 1999), los suelos del área de estudio se encuentran representados por Andosol, Leptosol, Phaeozem y Regosol (Figura 1.3).

Andosol, del japonés *an*, oscuro y *do*, suelo, son formados a partir de materiales ricos en vidrios volcánicos (cenizas volcánicas) y que, generalmente, tienen un horizonte superficial oscuro o bien un horizonte *vítrico* o un horizonte *ándico* que comienza dentro de los 25 cm desde la superficie (*World Reference Base*, FAO-ISRIC-ISSS, 1999). Presentan una capa de hojarasca sobre un horizonte superior con mucho *humus* (parte orgánica del suelo) con textura

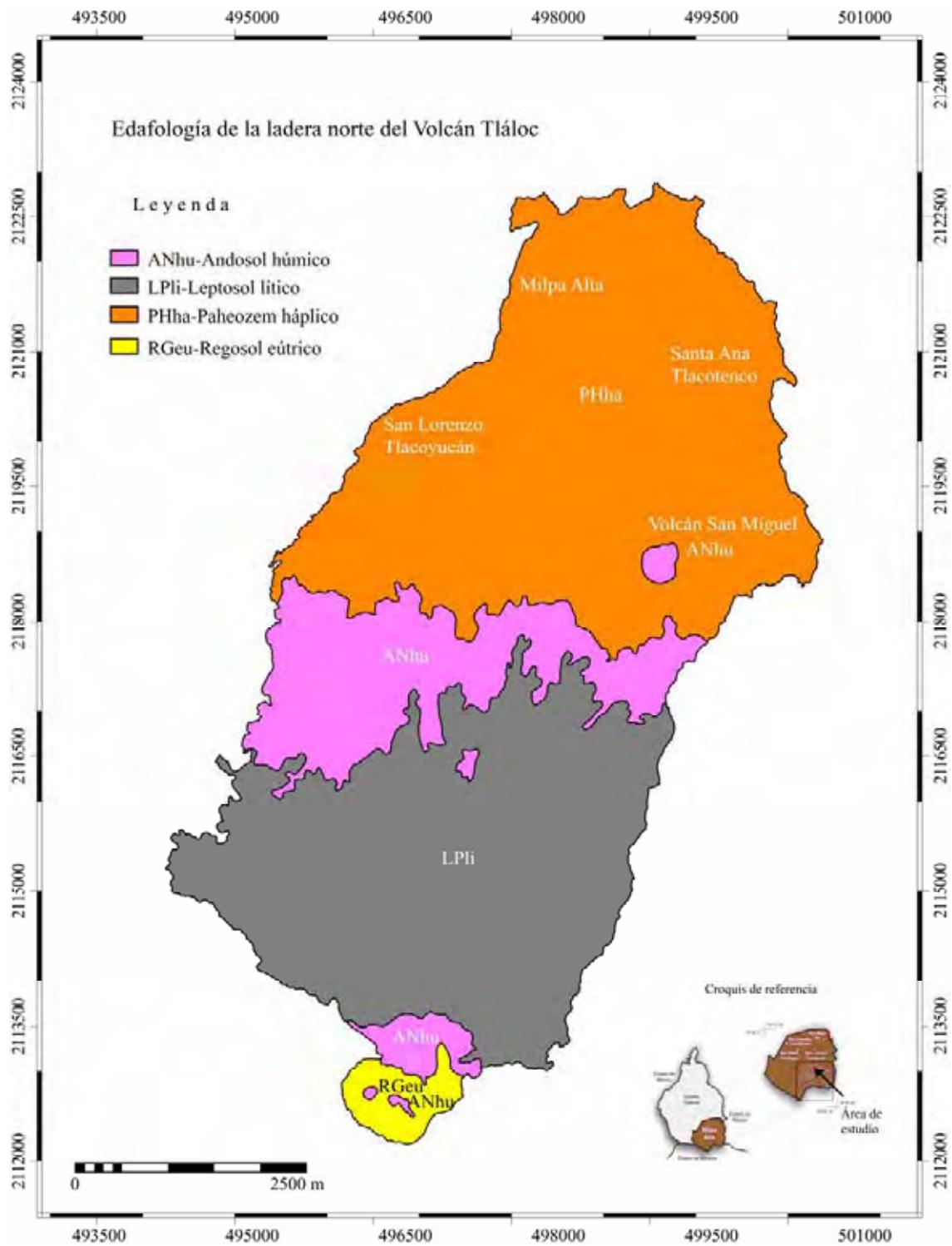


Figura 1.3 Suelos de la ladera norte del volcán Tláloc, Milpa Alta, Fuente: INEGI, 1984c y *World Reference Base*, FAO-ISRIC-ISSS, 1999

migajosa y que puede tener 30 cm de profundidad. La mayoría de los horizontes que los constituyen presentan una alta porosidad que llega a ser de hasta 70%. Estos suelos son de moderados a fuertemente ácidos en la superficie pues llegan a presentar pH de hasta 4.5 y con la profundidad el éste se incrementa hasta 6.0 en los horizontes con cenizas volcánicas. Presenta un alto contenido de materia orgánica con más de 20% en el horizonte superficial, debido a esta característica, la capacidad de intercambio catiónico es alta.

Leptosol, del griego Lithos, piedra, son suelos que se desarrollan generalmente en relieve montañoso y se caracterizan por la presencia de un horizonte muy delgado (con una profundidad menor de 10 cm) (*World Reference Base*, FAO-ISRIC-ISSS, 1999). Su textura es arenosa y areno-arcillosa, son muy pedregosos y en muchos casos, son el resultado de la erosión antrópica (Vela, 2006). En el área de estudio representan, en asocia con el Andosol húmico, la mayor parte de los subgrupos de laderas de montaña.

Phaeozem, del griego *Phaios*, oscuro y del ruso *zemlja*, tierra, terreno; son suelos ricos en materia orgánica, de color oscuro (*World Reference Base*, FAO-ISRIC-ISSS, 1999). Tienen un horizonte *A mólico* de color gris muy oscuro de hasta 50 cm y una saturación con bases >50% y una matriz de suelo, libre de carbonato de calcio, por lo menos hasta una profundidad de 100 cm desde la superficie del suelo, o hasta una capa contrastante (contacto lítico o paralítico, horizonte *petrocálcico*) entre 25 y 100 cm. Su material parental proviene de depósitos piroclásticos y pomex. El contenido de arcillas disminuye con la profundidad, y el pH en la superficie puede llegar a ser de más de 7.0 pero disminuye en su interior, al igual que la materia orgánica que es mayor a 1%, la que se encuentra en estado de *humus* (parte orgánica del suelo) bien desarrollado. La fertilidad de estos suelos es relativamente buena y pueden producir buenas cosechas, sin embargo requieren de fertilización de fósforo y otros elementos, así como de cal en condiciones intensivas de cultivo. Tradicionalmente se han utilizado para los cultivos de maíz y avena, aunque actualmente ocupan la mayor parte de las nopaleras (Naranjo-Arias *et al.*, 2002)

Regosol, del griego *Rhegos*, manta; indica la existencia de un manto de material no consolidado, es decir suelos poco evolucionados sobre material no consolidado (*World Reference Base*, FAO-ISRIC-ISSS, 1999). Los regosoles constituyen una etapa inicial de otro

tipo de suelo y presentan los horizontes de diagnóstico A ócrico a más de 50 cm de la superficie. Cuando la textura es gruesa estos suelos carecen de láminas de acumulación de arcilla (Naranjo-Arias *et al.*, 2002).

1.6 Vegetación

Los tipos de vegetación del área de estudio de acuerdo con INEGI (1984d) son: bosque de pino (*Pinus hartwegii*, *P. montezumae*, *P. leiophylla*), bosque mixto (*Pinus-Quercus*) y pastizal.

Bosque de coníferas. Representado por el bosque de *Pinus* sp. Se desarrolla en un intervalo altitudinal entre 2,800 a 3,000 m, conformado por varias asociaciones arbóreas en las que predominan las diferentes especies de: *Pinus leiophylla* y *P. montezumae* a los que se intercalan otras especies de pinos como *Pinus pseudostrobus*, *P. teocote* y *P. hartwegii* (Rodríguez, 2001).

Bosque mixto de *Pinus-Quercus*. Es una comunidad donde conviven especies de pinos y árboles de hoja ancha (los encinos están representados por las especies *Quercus rugosa*, *Q. mexicana* y *Q. crassipes*). En el área de estudio es posible encontrarlos entre los 3,280 y los 3,560 m. Las especies características son: *Pinus montezumae*, *Alnus acuminata*, *Alnus jorullensis*, y pastos como la *Muhlenbergia macroura* y *M. quadridentata*.

Los zacatonales subalpinos en el área de estudio son considerados como vegetación secundaria de los bosques de coníferas perturbados, favorecidas principalmente por los incendios forestales ligados al pastoreo (Naranjo-Arias *et al.*, 2002). Presentan dos estratos de gramíneas amacolladas, con una altura de 50 cm o más, y otra superficial. Presentan una cobertura del suelo mayor al 75% y las siguientes especies son las características: *Festuca tolucensis*, *Muhlenbergia macroura*, *M. quadridentata*, *Calamagrotis tolucensis* y *Alchemilla procumbens*

1.7 Aspectos socio-económicos

Milpa Alta se ha caracterizado por condiciones sociales de conflictos y enfrentamientos externos e internos, en cuanto al manejo de sus recursos naturales. Como menciona Naranjo-

Arias *et al.* (2002), desde la época prehispánica, el sistema de cultivo era de roza, tumba y quema con desmontes parciales sobre el bosque realizado por los aztecas que se establecieron en Milpa Alta hacia 1,300, a partir de entonces se fundan poblados en ciertos lugares estratégicos de esta área.

Estas condiciones no cambian durante mucho tiempo, ya que en la época de la Colonia persisten los sistemas agrícolas prehispánicos complementándose con nuevos cultivos como avena y chícharo, además la incorporación de técnicas nuevas como el uso de abono. Es en este lapso en que se agudizan los conflictos sociales producto del restablecimiento de tierras, por parte de la nueva organización política de la Colonia. Naranjo-Arias *et al.* (2002), menciona que este tipo de conflictos por la tenencia de la tierra presenta enfrentamientos constantes desde el siglo XIX hasta hoy en día.

Las prácticas tradicionales (agricultura de temporal) y el uso de la tierra no han sufrido grandes transformaciones producto de costumbres y conflictos por parte de los pobladores (Naranjo-Arias *et al.* 2002). De esta manera las actividades socioeconómicas se ven reflejadas en el ambiente biofísico, en la planicie y el piedemonte la actividad agrícola tradicional es predominante, con cultivos como el nopal, la avena y el maíz, mientras que en las laderas de montaña se conserva el bosque casi intacto.

Como se indicó anteriormente, el paisaje del área de estudio, en la actualidad no presenta gran perturbación en cuanto a las actividades económicas realizadas por la comunidad local. La situación agraria y su proceso de conformación han configurado de manera muy importante la situación productiva y de aprovechamiento de los recursos naturales en Milpa Alta.

El aprovechamiento del bosque se realiza mediante las prácticas tradicionales de colecta de hongos, hierbas comestibles y medicinales que se dan en temporada de lluvias y la utilización del carbón (el cual se prepara con maderas de encino, aile y ocote), actividades que disminuyen progresivamente; la primera por la falta de una buena comercialización en el mercado, la segunda por la disminución de las especies, debido a la colecta desmedida que se lleva a cabo y la tercera por la limitante de la sustitución del carbón por estufas de gas (Naranjo-Arias *et al.*, 2002).

Milpa Alta tiene una población de 96,773 habitantes que representa solamente el 1.2% del total del Distrito Federal (8,605,239). Es la Delegación más pequeña en términos demográficos y la mayor parte de la población es joven (61.6%) con edades que abarcan hasta los 29 años, mientras que la población adulta entre los 30 y 49 años representa el 25.4% y la población de 50 años y más el 11.7% (INEGI, 2001).

En los últimos 40 años en la Delegación, se registró un incremento de la densidad bruta de la población de 23.3 a 60.3 habitantes por hectárea en Milpa Alta. Esta densidad es comparativamente baja con respecto del Distrito Federal que tiene 140.26 habitantes por hectárea. La mayor parte de la población se concentra en 12 localidades, abarcando el 93.8% de la población (INEGI, 2001).

En términos del uso de suelo, la delegación se divide en dos áreas principales: agrícola, con aproximadamente 10,535 ha y forestal, estimada en 16,560 ha. Hacia el centro de los poblados el uso de suelo es básicamente habitacional, con mayor densidad de habitantes; en las inmediaciones una combinación de vivienda y parcela agrícola (INEGI, 2001).

La población económicamente activa correspondiente a las localidades para el área de estudio, esta representada por los poblados de Villa Milpa Alta (6,725 habitantes), Santa Ana Tlacotenco (3,342) y San Lorenzo Tlacoyucan (1,369). La distribución de la población económicamente activa por rama de actividad en orden de importancia es: servicios con 29% del total de la población de la delegación; comercio con 22% y el tercer sector de importancia es el bloque conformado por la agricultura, la ganadería y el uso forestal con 15%. La población dedicada a las labores agrícolas y pecuarias en Milpa Alta presenta una reducción importante debido a la falta de inversión y de apoyos, mantenida fuertemente por la agricultura del nopal y el cultivo de forrajes para abatir costos de la producción ganadera (INEGI, 2001).

Capítulo 2. Marco teórico-conceptual

2.1. Teoría general de los sistemas y la geomorfología

Durante la posguerra se dio un movimiento de amplio espectro filosófico y científico, en torno a la llamada teoría general de sistemas (Aracil, 1983). De acuerdo con Bertalanffy (1976), esta teoría surge de la confluencia de las siguientes consideraciones: a) Pretende capitalizar la existencia de paralelismo entre diferentes campos científicos y suministrar las bases para una teoría integrada de la organización y de la complejidad y b) Es considerada como una metodología específica inmersa en el movimiento filosófico, científico y técnico que representa estas tres disciplinas.

Un sistema geomorfológico es una región del espacio tridimensional o una cantidad de materia, delimitada por una superficie arbitraria, con una superficie que delimita el sistema conocida como frontera; dicha frontera puede ser real o imaginaria, puede hallarse en reposo o en movimiento, y puede variar de tamaño o forma (Short *et al.*, 1986). La región del espacio físico que queda fuera de las fronteras recibe el nombre de entorno o ambiente; el término entorno se reduce a la región específica que interacciona de alguna manera con el sistema y tiene, por tanto, una influencia sobre él que puede cuantificarse (Short *et al.*, 1986). Algunos conceptos de sistemas geomorfológicos se pueden ver en la Tabla 2.1

La aplicación de esta teoría general de sistemas en geomorfología ha sido ampliamente discutida por Chorley y Kennedy (1971 ambos citados en De Pedraza, 1996). Existen dos tipos de sistemas: sistema cerrado y sistema abierto. Un sistema abierto es aquel en el que tanto la masa como la energía pueden atravesar las fronteras del mismo. Un sistema cerrado es aquel, donde la masa no trasciende la frontera del mismo.

De Pedraza (1996), menciona que las formas del terreno presentan una serie de interrelaciones con diferentes categorías, que deben ser analizadas en el contexto sistémico. Chorley y Kennedy (1971 ambos citados en De Pedraza, 1996), definen los siguientes niveles: sistema morfológico (morfográfico, si se prefiere, ya que trata de las relaciones geométricas y

Tabla 2.1 Conceptos de los sistemas geomorfológicos

Concepto	Definición	Ejemplo
Cascada	Tipo de sistema a través del cual la energía y la masa fluyen de un sistema a otro.	Movimiento de agua y sedimentos en una cuenca sedimentaria.
Retroalimentación	Las salidas o productos de un sistema actúan como retroalimentación o entradas del mismo sistema. El efecto puede ser positivo o negativo.	Cuando una barra de río es constantemente erosionada, ésta se vuelve mucho más recta en forma, lo cual reduce la erosión (retroalimentación negativa)
Equilibrio	Balance entre la forma y el proceso.	Las laderas son el resultado entre el balance de la resistencia de las rocas y los procesos erosivos.
Umbral	Condición que debe alcanzar un sistema para ir de un estado a otro.	Un deslizamiento ocurre cuando las fuerzas activas exceden a las fuerzas de resistencia.
Equifinalidad	Resultado de estados finales similares, en formas y orígenes diferentes.	Las grietas de desecación pueden resultar de la sequía, volcanismo y enfriamiento.
Equilibrio químico	Estado de equilibrio resultado del balance de las fluctuaciones en un sistema de cambio constante.	Los ríos mantienen equilibrio de la forma del canal en tanto continúa la degradación a largo plazo.
Estado constante	Estado de equilibrio a través de un sistema invariante en el tiempo.	El contenido de caliche en el suelo alcanza un valor constante.

Fuente: Short *et al.*, 1986

espaciales), sistema en cascada (dinámico, pues trata las relaciones entre agentes y acciones energéticas) y sistema proceso-respuesta (morfológico, pues trata las relaciones entre geometrías-agentes-acciones, es decir, los procesos morfológicos).

Ahnert (1998), habla de los principales aspectos, con base a su concepción de la geomorfología. La geomorfología sistemática es una disciplina, la cual propone que los procesos desarrollados en el relieve, así como él mismo, forman parte de un sistema que se rige por las leyes físicas, donde el intercambio de energía es el motor de los sistemas. Esa nueva concepción permite insistir sobre los flujos de materia y energía, sobre los balances, sobre el trabajo efectuado por la energía introducida en el sistema y, por consiguiente, sobre su rendimiento (Tricart, 1982).

Por otra parte, la transferencia de materia está ligada a la transferencia de energía, aunque en el caso de la energía solar, hay energía pura transfiriéndose de un sistema a otro sin algún suministro o traslado de materia. De tal manera que, sólo una pequeña fracción de la energía solar que llega a la Tierra, ésta siendo usada por los procesos geomorfológicos, por lo que el suministro o traslado de materia en la superficie de la Tierra ésta dado por el balance de masas, es decir, las formas del relieve se desarrollan y cambian esencialmente por la transferencia de masa, más que de energía. En diferentes puntos de la superficie de la Tierra, los diferentes incrementos de roca o del material del suelo están siendo removidos por procesos denudatorios o deposicionales. De acuerdo con lo anterior, la investigación de sistemas geomorfológicos es parte de la geomorfología funcional (Ahnert, 1998).

2.2 Geomorfología funcional

La geomorfología funcional proporciona información detallada del relieve. Se refiere a la descripción de los vínculos, expresados a menudo en términos cuantitativos, entre una o más variables geomorfológicas; trata de la explicación de los componentes de las geoformas, así como la influencia del entorno inmediato y a nivel regional sobre el relieve, dentro de un enfoque de sistemas. De la descripción de las relaciones entre procesos, materiales y formas es posible desarrollar modelos reconstructivos de escenarios pasados, pero también para elaborar pronósticos sobre el posible futuro de las formas del relieve (Ahnert, 1998).

2.3 Relaciones causales y funcionales.

Cuando la asociación funcional de todo un conjunto de variables o factores geomorfológicos ha sido localizada y descrita, puede iniciarse una serie de análisis más complejos, pero básicos para generar información geomorfológica relevante en términos de procesos morfodinámicos, con relación al comportamiento de la geoforma como un componente de un sistema o como un sistema en sí mismo. Las relaciones que hay entre varios aspectos dentro de una forma del relieve, hasta los que existen dentro de un sistema más complejo, son fuente de vasta información.

Lo que ocurre dentro de un sistema de geoformas, en cuanto a la dinámica superficial, repercute a nivel regional. Se ha establecido que en función de un proceso, forma o características particulares de litología y de suelo, está la magnitud del efecto o resultado (Ahnert, 1998). Algunos casos de relaciones funcionales son los siguientes:

- 1) Entre propiedades de diferentes geoformas (ej. valle y abanico aluvial);
- 2) Entre diferentes propiedades de la misma geoforma (ej. Pendiente, altura relativa y geometría de la ladera).
- 3) Entre propiedades de distintos materiales (ej. composición química de la roca y de la cubierta del suelo);
- 4) Entre diferentes propiedades del mismo material (ej. granulometría y los tipos de sedimentos).

Siguiendo las consideraciones anteriores, para Ahnert (1998) existen los siguientes componentes en la investigación de sistemas geomorfológicos: formas, materiales y procesos; y para su estudio los sistemas han sido subdivididos en sistemas estáticos, sistemas de procesos y sistemas de proceso-respuesta.

La organización jerárquica dentro del sistema es fundamental para su entendimiento (Smeck, *et al.*, 1983). De Pedraza (1996) propone una jerarquización geométrica según los niveles: elemento morfológico, forma sencilla, forma compuesta y conjunto de formas. Estas geometrías deberán correlacionarse con sus categorías genéticas equivalentes (glacial, eólico, etc.) y conjunto de procesos (o sucesión de éstos en el espacio y tiempo, según la secuencia que proceda).

2.4 El sistema del suelo

Los suelos son definidos como sistemas abiertos, por lo que, en todas las investigaciones de suelo es esencial entender cómo actúan los materiales del suelo, material parental, el relieve y el agua; actúan recíprocamente para producirlo (Smeck *et al.*, 1983). Sin estos conocimientos

es difícil entender las relaciones del suelo dentro del paisaje. Además los suelos se comportan como un sistema dinámico, constantemente perturbado por fuerzas internas y externas. Arnold (1982), menciona que existen fronteras naturales, las cuales han sido aplicadas a las unidades, consideradas para representar al suelo: paisajes, catenas, polipedones, pedones, perfiles, horizontes, ped y muestras de suelo; que son algunos términos en los cuales se representa la jerarquía del sistema del suelo con sus respectivas fronteras. Dijkerman (1974) ha descrito una jerarquía del sistema del suelo, consiste en sistemas de bajo nivel jerárquico, que al mismo tiempo forman parte de uno superior (Tabla 2.2). El nivel jerárquico y las fronteras elegidas para definir un sistema de suelo son dependientes del alcance de la investigación. Para los fines de este estudio, el nivel jerárquico corresponde a un pedón (*Soil Survey Staff*, 1999).

Tabla 2.2 Jerarquía del los sistemas del suelo para el modelamiento del desarrollo del suelo.

Nivel	Sistema	Definición
1	Provincia pedológica	Parte de una región, aislado y definido por su clima y topografía y caracterizada por un grupo particular de suelos.
2	Unidad de paisaje compuesta	Un área cuya distribución espacial corresponde con un parteaguas natural o un subparteaguas y contiene corrientes de primer a enésimo orden.
3	Unidad de paisaje simple	Una repetición regular de una secuencia de suelos en asociación con una cierta topografía (Milne, 1935).
4	Pedón/polipedón	Pedón es el más pequeño, unidad tridimensional en la superficie de la tierra que puede ser considerada como suelo. Un polipedón es un grupo contiguo de pedones similares (<i>Soil Survey Staff</i> , 1999).
5	Horizontes del suelo	Una capa de suelo mineral u orgánico, paralelo a la superficie de la tierra que tiene características formadas por procesos pedogenéticos.
6	Peds (unidades macroestructurales)	Conjunto de suelo natural que consiste en un conjunto de partículas primarias y separado en peds por las superficies de debilidad que son reconocibles como vacíos naturales o por la presencia de cutanes
7	Unidades microestructurales	Incluye rasgos micromorfológicos, agregados y microagregados (<5 mm) partículas de arenas, limos y arcillas.
8	Fases físicas	Mineral, fase gaseosa.

Fuente: Smeck *et al.*, 1983

2.5 Geomorfología-Edafología

Modernas investigaciones están demostrando la cercana dependencia de los suelos y el relieve en una nueva disciplina, geomorfología-suelo y pedogeomorfología propuesta por Conacher y Darlrymple (1977 citado por Hall 1983). Birkeland (1999) define *soil geomorphology* como el estudio de los suelos y su uso en relación con la evolución de las formas, la edad y la estabilidad; procesos de superficie y paleosuelos. Wysocky *et al.* (2000), lo definen como el estudio científico del origen, la distribución y la evolución de los suelos, paisajes y depósitos superficiales y los procesos que los crean y alternan con ellos. Para Gerrard (1992), es la evaluación de las relaciones genéticas entre los suelos y las formas de relieve.

Hall (1983), menciona que esta cercana relación puede ser esperada si se consideran las definiciones de las ciencias de geomorfología y edafología. La geomorfología es la ciencia que tiene por objeto la descripción y explicación del relieve terrestre (Coque, 1984). La edafología es mejor definida como el estudio de la génesis, la morfología, la distribución y el uso del suelo (Hall, 1983). Para Coque (1984), la geomorfología mantiene estrechas relaciones con la geología, la geoquímica, la edafología, la climatología, la hidrología y la biología.

Por otra parte los suelos se consideran para su formación como un resultado de la interacción del material parental, clima y los organismos vivos influenciados por el relieve a través del tiempo (Jenny, 1941). Así como el suelo es resultado de la interacción de varios factores, las superficies geomórficas son también el resultado de varios fenómenos complejos que son el resultado de la erosión, depositación y actividad tectónica en o cerca de la superficie de la Tierra. Las superficies geomórficas, que han sido definidas como una posición de la superficie de la tierra limitada en tiempo y espacio (Ruhe, 1969). La superficie puede ser erosional o construccional y es frecuentemente una combinación de ambas.

La actividad tectónica y la variación en la litología pueden producir paisajes geomorfológicos que pueden ser confundidos con superficies de erosión, por lo que es necesario considerar que el desarrollo del suelo no comienza desde la erosión o la depositación, sino que tiene que alcanzar un estado de equilibrio. Por lo que está claro que el suelo en una superficie

geomórfica, es más joven que el material del cual está formado y más joven aún que la superficie en la cual se está desarrollando.

Varios intentos se han llevado a cabo para identificar y definir las partes del paisaje geomorfológico. Wood (1942), segmentó el perfil de una ladera y nombró cuatro unidades: superficie de lavado (*waxing slope*), cara libre (*free face*), talud detrítico (*debris slope*) y piedemonte (*pediment*). Ruhe (1960), modificó y renombró varios de los segmentos sugeridos por Wood (1942), identificando cinco elementos en una ladera totalmente desarrollada: superficie cumbral (*summit*), hombro de la ladera (*shoulder slope*), dorso de la ladera (*backslope*) piedeladera (*foot slope*) y extremo inferior del piedeladera (*toeslope*). En esta discusión de las posiciones de laderas, Ruhe describe la relación geométrica y algunos de los procesos geomórficos superficiales que están en curso o que han causado el desarrollo de la misma (Figura 2.1).

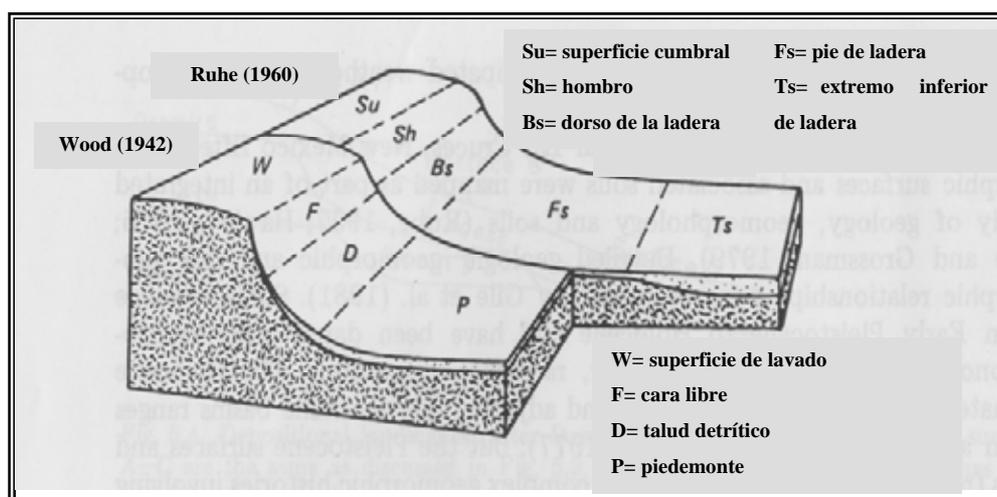


Figura 2.1. Elementos de una ladera; en el fondo la interpretación hecha por Ruhe (1960). Modificada a partir de la interpretación de Wood (1942) en primer plano. Fuente: Hall (1983).

2.6 Conceptos geomorfo-edafológicos

El concepto de catena es presentado por Milne (1936) para identificar los suelos en el paisaje geomorfológico. Actualmente el concepto ha sido modificado con el término de

toposecuencia, con una connotación morfológica; un cambio en colores, que está relacionado con la altura relativa y de este modo con los cambios hidrológicos. Por otra parte, catena lleva consigo una connotación proceso-respuesta. Los suelos en una catena difieren no solo en características morfológicas, sino que se consideran como el resultado de la erosión, el transporte y la depositación de material superficial, tanto como lavado, traslocación y depositación de componentes químicos en el suelo (Hall, 1983).

Para Gerard (1992), el concepto básico de catena es el movimiento y la distribución del agua en una ladera. La precipitación en la superficie de la Tierra puede seguir dos caminos: flujo superficial e infiltración. La cantidad de humedad es gobernada por factores como la cantidad y duración de la precipitación, características topográficas, permeabilidad del suelo, material subyacente, cobertura vegetal y condición física de la superficie del suelo. Sin embargo, el concepto de catena, está continuamente ajustándose a los cambios del ambiente de un paisaje dado (Dan y Yaalon, 1964 citado en Hall, 1983).

Galicia *et al.* (1995) mencionan que una catena es una secuencia simultánea y ordenada pendiente abajo en un sistema de ladera. La secuencia ordenada ideal está compuesta por tres elementos topográficos esenciales, en los cuales se generan procesos geomorfológicos y edáficos particulares: a) la zona eluvial, que topográficamente se localiza en la porción más alta (cresta o superficie cumbral) y se caracteriza por tener una morfología plana; b) la zona coluvial, topográficamente se localiza en el dorso de la ladera, presenta un marcado ángulo de inclinación y es típicamente el área de transporte, y c) la zona aluvial, topográficamente pertenece al piedeladera, presenta una morfología plana y es la zona de depositación (Gerrard, 1992; Birkerland, 1999).

La naturaleza y la geometría de una ladera pueden ser usadas no solo para describir a la ladera en sí misma, sino puede ser usada para predecir las características del suelo en una posición determinada. Las características morfológicas del sistema de ladera, frecuentemente usadas en su descripción, son las siguientes: a) gradiente o pendiente, b) longitud, c) orientación, d) curvatura/forma y e) elevación (Schaeztl *et al.*, 2005).

a) Pendiente. El gradiente se refiere a la inclinación máxima de la ladera con respecto a un plano horizontal, la que se expresa en grados, en un intervalo entre los 0° y 90°. Sin embargo la mayoría de los especialistas del suelo expresan la pendiente en porcentaje (por ejemplo, 45° equivale a 100%). La pendiente está estrechamente relacionada con el desarrollo de suelo, ya que esto afecta las tasas de movimiento del agua y los sedimentos sobre la ladera. La inclinación de la ladera es interpretada como la energía potencial que posee, por esta razón, laderas más escarpadas tienden a tener perfiles delgados y suelos menos desarrollados (Schaetzl *et al.*, 2005).

b) Longitud. La longitud de la ladera está directamente relacionada con la erosión potencial, y de este modo relacionado con el desarrollo de suelo. Por ejemplo, sobre laderas más largas el escurrimiento permite acumulación de aluviones (Schaetzl *et al.*, 2005). Daniels y Hammer (1992), mencionan que la pendiente y la longitud son factores importantes en determinar el material erosionado de un área.

c) Orientación de la ladera. Es la dirección en la cual la cara de la ladera está buzando pendiente abajo. La incidencia del ángulo del sol varía de una orientación a otra, debido a las diferencias en el relieve local y la subsiguiente sombra parcial del paisaje. En áreas de relieve montañoso localizado en latitudes medias (entre 30 y 60°), la orientación se convierte en el factor de incremento de la radiación solar recibida. Generalmente en el hemisferio norte, las orientaciones norte y noreste de las laderas son frías y húmedas más que en otras orientaciones (Schaetzl *et al.*, 2005). Las propiedades del suelo varían con la posición topográfica, una razón es la orientación de la ladera (norte vs. sur) en la cual se forma el suelo (Galicia *et al.*, 1999).

d) Curvatura/ forma de la ladera. La curvatura de la ladera se refiere al cambio de orientación a lo largo del perfil de la ladera. Cuando la curvatura de la ladera es mínima, los contornos son lineales vistos en planta. Cuando las laderas son más complejas, la mayoría deben ser consideradas holísticamente en un sistema tridimensional (Schaetzl *et al.*, 2005). La morfografía que presentan las distintas laderas en el paisaje y su influencia en el desarrollo de los horizontes del suelo, es debido a su anisotropía. Esto explica los procesos del relieve y el

resultado del suelo en cada una de las posiciones, asociándolo principalmente con la influencia del drenaje y el depósito de los materiales (Hall, 1983).

e) Altitud. Al describir una ladera, normalmente se menciona su elevación (Schaetzl *et al.*, 2005). La altitud afecta la temperatura de un sitio, es decir, la temperatura del aire disminuye de forma regular con la altura, como consecuencia del enrarecimiento de éste, así como la disminución de su contenido en vapor de agua y en polvo, hechos que hacen disminuir su capacidad de absorción calorífica. Los valores del gradiente térmico a nivel mundial, se sitúan entre 0.5 y 0.6°C cada 100 m (Coque, 1984). Además la redistribución del agua pendiente abajo, subsuperficial y superficialmente, da a las propiedades del suelo un indicativo de condiciones de mayor humedad e incrementa el movimiento vertical y lateral de los materiales (Birkeland, 1999).

2. 7 Procesos en una ladera

El reconocimiento de la catena como una unidad básica de paisaje como se mencionó anteriormente, ha permitido el estudio de las interrelaciones de los suelos y los procesos que ocurren en una ladera. Sin embargo, Conacher y Dalrymple (1977), consideraron a la catena como un concepto bidimensional, Hugget (1975) sugiere que los procesos que operan en el paisaje son tridimensionales en la naturaleza. Básicamente en la discusión se asume que en el paisaje, existen líneas de flujo de material, superficial y subsuperficialmente, esas líneas de flujo siguen donde el material es uniforme y donde las líneas del contorno son paralelas. Donde quiera que la curvatura ocurra en el contorno las líneas de flujo convergen o divergen. Laderas cóncavas, pendiente abajo, permiten que las líneas de flujo sean convergentes y los contornos convexos permiten que líneas de flujo sean divergentes.

El movimiento y la distribución del agua en las laderas son la razón principal de las diferencias en los suelos dentro del paisaje. Aunque por tierra el flujo es el más frecuente y obvio de los procesos, el proceso más dramático de distribución de agua, es evidente que el movimiento de agua en los horizontes del suelo (Hall, 1983). La mayoría de los suelos son anisotrópicos, que son el resultado de la depositación no-uniforme de materiales, proceso

relacionado con el desarrollo del perfil, o el resultado de un incremento de la densidad del suelo con la profundidad en materiales uniformes (Hall, 1983). Las laderas tienen curvaturas complejas, tanto lateral como verticalmente. Así los patrones de flujo resultantes son combinados e ilustrados como lo muestra la Figura 2.2.

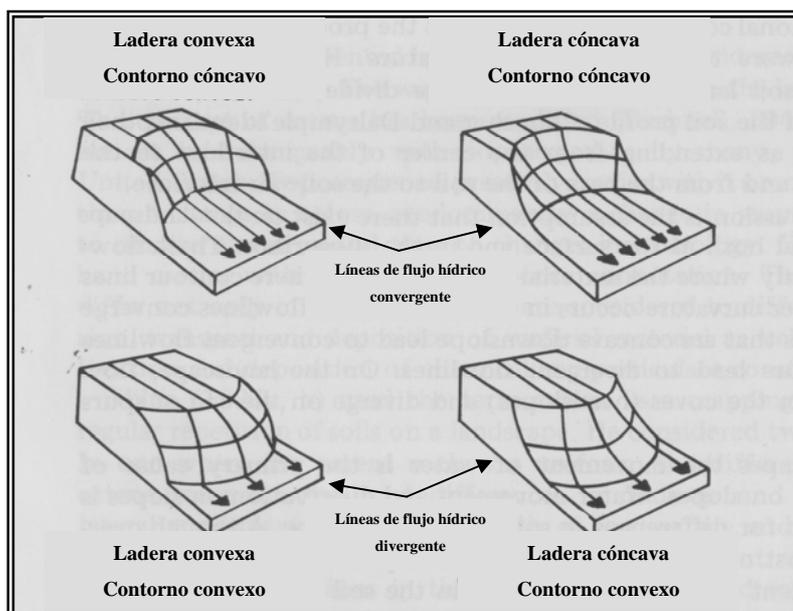


Figura 2.2 Influencia de la curvatura de la ladera con respecto a las líneas de flujo. Fuente: Hall, 1982

Los suelos son el producto de las interacciones complejas de procesos físicos y químicos que por sí mismas son gobernadas por el clima y el relieve, a través del tiempo. Como el clima, la geología y el relieve varían de un área a otra, las interacciones entre éstas cambian y por consiguiente algunos modelos predictivos deben cambiar. Conacher y Dalrymple (1977), han intentado relacionar procesos del suelo para cada posición en el paisaje geomorfológico:

a) Superficie cumbre. Es considerada como el elemento más estable del paisaje geomorfológico, predomina el movimiento vertical del agua, por lo que la retención de ella da como resultado una gran uniformidad de horizontes de suelo. En general, los suelos sobre cumbres amplias presentan un drenaje en superficie deficiente, aunque a diferencia del drenaje subsuperficial domina en sentido vertical (Hall, 1983),

b) Hombro de la ladera. De forma convexa, representa una mayor superficie de escurrimiento. Este elemento, es una superficie relativamente inestable, representada por la erosión, debido al movimiento lateral de materiales, que puede llegar a ser el proceso más importante. Por lo que la presencia y la profundidad del suelo se reduce en esta posición; el espesor del material orgánico (*solum*) y el contenido de materia orgánica son mínimos (Hall, 1983),

c) Dorso de la ladera. El proceso dominante es el transporte, tanto de material como de agua, el cual se puede presentar en forma de flujo; laminar y concentrado, caída, lavado superficial y reptación; este elemento del paisaje geomorfológico es considerado inestable. Los suelos en el dorso de la ladera muestran horizontes más delgados (Hall, 1983),

d) Piedeladera. Forma cóncava del perfil longitudinal en el que la ladera es relativamente estable, a causa de su constante depositación de materiales. Los suelos son comúnmente heterogéneos debido a la infiltración irregular y la depositación no-uniforme de materiales. En este elemento el drenaje es pobre en sentido vertical y lateral, los horizontes y su grosor son variables; aunque comúnmente son irregulares o discontinuos (Hall, 1983) y

e) Extremo inferior de piedeladera. La última posición de una ladera ideal, es inestable como consecuencia de su constante depositación; donde predominan los materiales aluviales. Los suelos son mejor drenados por esta condición muestran más características de desarrollo, a pesar de su constante destrucción, principalmente por los procesos erosivos (hídrico laminar y eólicos), donde los horizontes superficiales resultan más afectados, sin embargo, al interior del perfil el suelo presenta mayor desarrollo de horizontes, a menudo de mayor espesor como consecuencia de la depositación frecuente de aluvión. (Hall, 1983).

Por otra parte Gerrard (1992), indica que además cada parte de una ladera es caracterizada por sus propios procesos geomorfológicos: la superficie cumbral y el dorso de la ladera son erosionados, y el piedeladera es una posición acumulativa. Los estudios de Malo *et al.*, 1974 y Lepsch *et al.*, 1977 ambos citados por Hall (1983) en el oeste de Estados Unidos y Brasil respectivamente, coinciden en que la posición del relieve dictamina la magnitud de los procesos de erosión y sedimentación afectando directamente las propiedades de los suelos (Figura 2.3).

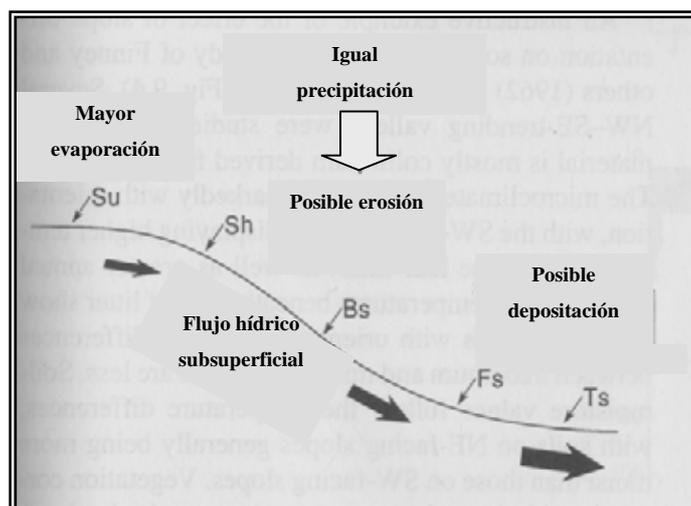


Figura 2.3 Diagrama esquemático de algunos procesos geomorfológicos y pedológicos asociados con cada elemento de una ladera, donde se interpreta que las propiedades del suelo deberían estar relacionadas con los procesos de erosión y depositación y además con las cantidades relativas de agua (Birkeland, 1999).

Young (1976 citado por Birkeland, 1999), describe el espesor de los horizontes del suelo y su posición en la ladera (Figura 2.4). Los horizontes permanecen del mismo espesor (a), pueden espesarse (b), o adelgazarse (c) a lo largo de la ladera, algunos consiguen ser muy profundos (d), o poco profundos (e), o al término de la ladera comienza un nuevo horizonte (f), finalmente un horizonte cambia lateralmente a otro pendiente abajo (g, h, i). Estas interpretaciones resultan en relaciones funcionales diferentes.

Finalmente cabe mencionar que las formas del relieve en pequeña escala a menudo son pasadas por alto, sin embargo, son muy importantes para el desarrollo de suelo. Las dimensiones de dichas formas son de alrededor de decenas de metros, consideradas como microrelieve, en donde el impacto pedogenético en la microtopografía depende frecuentemente del clima local. La microtopografía no siempre impacta el paisaje, sin embargo, acelera o desacelera el desarrollo del suelo por remitir sustancias disueltas y suspendidas en el agua a cierta distancia (Schaeztl *et al.*, 2005).

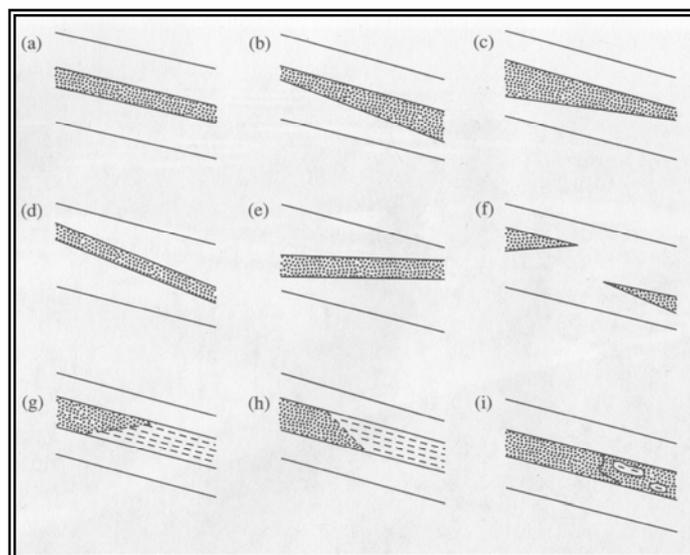


Figura 2.4 Posibles variaciones en el espesor de los horizontes del suelo con respecto a la posición en la ladera en catenas. Fuente: Birkelend, 1999.

2.8 Aplicación de enfoques, modelos y paradigmas.

El establecimiento de la relación anterior permite evaluar áreas geográficas. Gamble *et al.* (1970), trabajaron con suelos en superficies que alcanzaron edades del Plioceno al Holoceno, donde los suelos en las superficies más antiguas fueron relativamente uniformes como resultado de la uniformidad del material parental y la influencia de los procesos a lo largo de millones de años. En la misma región, Daniels *et al.* (1970), determinaron que el grosor del *solum* (parte orgánica del suelo) y el contenido de plintita y gibsita se incrementaron desde la superficie más joven a la más vieja.

Lepsch *et al.* (1977), estudiaron la relación superficie geomórfica-suelo en el trópico brasileño y definieron que, en general, en diferentes superficies se tiene diferentes clases de suelo, pero que más de un tipo de suelo puede ser encontrado en una superficie geomórfica dada. En el medio oeste de Estados Unidos, Malo *et al.*, 1974, hallaron que la posición en el paisaje geomorfológico determina la magnitud de los procesos geomórficos de denudación y depositación, los cuales a su vez afectan directamente al suelo y por lo tanto a sus propiedades. Los autores concluyen que los suelos de los piedemontes presentan un desarrollo homogéneo,

de modo que las propiedades físicas y químicas pueden ser tratadas como variables continuas más que como variables discretas.

En el valle *Willimate* de Oregon siete superficies geomórficas y su asociación con los suelos fueron mapeados por Pearson *et al.* (1970). Las superficies trazadas visualmente a lo largo de todo el valle alcanzaron una edad del Pleistoceno al Holoceno, y aunque los suelos mostraron una tendencia a incrementar su desarrollo sucesivamente en superficies geomórficas más antiguas, no todos los suelos, en una delineación geomórfica dada, exhiben el mismo grado de desarrollo del perfil. Ellos atribuyen esta diferencia en desarrollo para los más recientes pedisedimentos en alguna parte de la superficie.

Ruhe (1969) a finales de la década de los 60's y 70's, se dedicó a analizar la evolución del paisaje con respecto a la formación del suelo en *Iowa* y estableció la importancia de los estudios de paleosuelos. Sus aportaciones principalmente fueron dirigidas a determinar la estratigrafía de las superficies geomórficas, los procesos de destrucción y construcción del relieve a partir de las superficies geomórficas, menciona que la importancia de la evolución del paisaje geomorfológico radica en la determinación de suelos sepultados con base a análisis estratigráficos.

Por otro lado, Butler en 1982, desarrolló un modelo llamado el concepto del ciclo K, a partir de la consideración del desarrollo del suelo, como consecuencia de la estabilidad de una superficie geomórfica como la llama Ruhe (1960). Si dicha superficie y el suelo son erosionados, se forma un nuevo suelo, una vez que se estabilice la superficie. De lo contrario si la superficie es inestable el suelo consigue ser sepultado, y por lo tanto, se conserva un paleosuelo como evidencia de un periodo de estabilidad en el pasado. La serie de acontecimientos en el desarrollo de cada capa de suelo es reconocida como un ciclo de K (K del griego *khronos*, tiempo), y capas de suelo sepultadas representan ciclos de K más tempranos K_1 , K_2 , etc. Al datar el material de capas antiguas, hay una oportunidad de probar las hipótesis de los suelos principales, una opción de la cual carece el modelo operacional de suelo uniforme.

Paton *et al.* (1995), argumentaron que muchos paradigmas tradicionales pedogenéticos están deteriorados y propusó sustituirlos por una implicación más geomorfológica, por procesos superficiales y biológicos que actúan sobre un manto intrínsecamente móvil de sedimentos.

Tsui *et al.* (2004), en el estudio de los efectos de la posición topográfica y el tipo de vegetación con respecto a las propiedades del suelo eligieron las tierras bajas de un bosque lluvioso al suroeste de Taiwán. El área de estudio comprende el noroeste del monte *Nanjenshan* en el Parque Nacional de Kenting. En este estudio se seleccionaron tres pedones representativos de suelo, en la superficie cumbral; el dorso de la ladera y en el piedeladera para describir las características micromorfológicas y para interpretar los procesos pedogenéticos. Lo que se determinó fue que las propiedades del suelo en diferentes posiciones de la ladera fueron significativamente afectadas por el grado de desarrollo y los procesos de lavado del suelo, es decir, los suelos en la posición de la superficie cumbral contienen bajo Ca^{+2} y Mg^{+2} intercambiables, acumulados de iones solubles y depositados en la posición de piedeladera donde el lavado es fuerte y el enriquecimiento del suelo es alto.

Se menciona que la pendiente ha sido considerada uno de los más importantes factores abióticos que controlan los procesos pedogenéticos a una escala local; pendientes fuertes contribuyen a un gran escurrimiento, como también a una gran traslocación de materiales de superficie, pendiente abajo a través de superficies de erosión y el movimiento en masa del suelo. Además mencionan que la influencia de la pendiente en las propiedades del suelo ha sido relacionada con las superficies inclinadas de forma cóncava y convexa que controlan la distribución del agua y materiales solubles de una superficie superior a una inferior dentro de una elevación.

El trabajo realizado por Krasilnikov *et al.* (2005), se llevó a cabo en la Sierra Madre del Sur, México, en una área de bosque tropical de montaña, donde el arreglo espacial de los suelos es atribuido comúnmente a los procesos geomorfológicos. Aunque las laderas son severamente afectadas por caída y deslizamiento en escarpes, el buen desarrollo de suelos profundos ocupa alrededor de 25% de las laderas con gradientes de pendiente de 45-90%.

El Municipio Pluma Hidalgo, Estado de Oaxaca, donde dos toposecuencias de suelo fueron seleccionadas para su estudio una en una ladera convexa (La Cañería) y otra en una ladera cóncava (Palo Piedra). En ambas toposecuencias por el grado de desarrollo, se designaron horizontes de diagnóstico secuencia A-E-B o A-B. Los colores son negros en los horizontes superficiales y en los horizontes B los colores son rojos. La estructura varía de angular a subángular y el contenido dominante de arcillas fueron: la kaolinita, la esmectita y la vermiculita; presentes en casi todos los suelos.

Con base en el dorso de la ladera de la primera toposecuencia, los estudios de los fragmentos de roca, las propiedades químicas y la micromorfología, se concluyó que, una acumulación de materiales coluviales inusual está relacionada directamente con la dinámica de la ladera, es decir con los procesos de remoción en masa. Dichos procesos tienen incidencia sísmica. Con respecto al origen acumulativo de las posiciones de piedeladera en ambas toposecuencias es reportada también una inusual clase de sedimentos; por ejemplo, en la ladera convexa existen evidencias de sedimentos discontinuos y en uno de los perfiles de la primera toposecuencia existe la evidencia de dos perfiles sepultados.

2.4 Materiales volcánicos.

Los terrenos volcánicos tienen una mayor variedad de tipos litológicos de rocas, más que cualquier otro ambiente superficial sobre la superficie de la Tierra (Leamy, 1984). Estos terrenos incluyen lavas, depósitos piroclásticos y depósitos de una amplia gama de procesos acumulativos que ocurren en terrenos volcánicos (bombas, lapilli, por ejemplo). Aunque varias órdenes de suelo se desarrollan sobre materiales volcánicos, los Andosoles se presentan sobre depósitos piroclásticos. Los suelos desarrollados en piroclastos y otros materiales de fragmentos volcánicos, ocupan sólo aproximadamente el 0.8% de la superficie de la Tierra (Daniels y Hammer, 1992).

El concepto central de un Andosol es el de un suelo que se desarrolla a partir de una material volcánico (como la ceniza volcánica, la piedra pómez, cenizas, lava) y/o en materiales volcanoclásticos, con minerales (amorfos) o complejos de aluminio-humus que dominan la

fracción coloidal. Pocas órdenes de suelo, excepto suelos orgánicos, tienen una gama tan específica de materiales parentales y ambientes deposicionales, ya que las lavas y el material piroclástico, tienen una amplia gama de ambientes y mineralogía. Para un suelo que se estudia en estos ambientes es importante entender los procesos de depositación de los materiales y su variabilidad regional.

Los procesos que dan origen a fragmentos de rocas volcánicas son: primarios (erupción) y los secundarios (intemperismo y denudación por ejemplo) (Wright, 1987). Tanto los procesos primarios como secundarios desarrollan brechas, partículas del tamaño de las arenas y arcillas (Fisher y Schmincke, 1984).

En el mismo contexto, la escoria, las cenizas y la pómez son tipos comunes de fragmentos volcánicos, que por lo general son de un tamaño mayor que los lapilli. La pómez varía de color blanco a marrón, es sumamente vesicular; que por lo general flota sobre el agua. La escoria y las cenizas son términos esencialmente sinónimos aplicados al cristal opaco, por lo general de composición máfica (Fisher y Schmincke, 1984). Los depósitos piroclásticos son los fragmentos de lava y de roca producidos por explosión, que se dividen en tres tipos basados en el modo de transporte y depositación: de caída, de flujo y de oleadas.

Shoji *et al.* (1993), reconocieron que los suelos desarrollados en materiales piroclásticos tienen propiedades únicas. Los Andosoles tienen alta capacidad de retención de agua, de cohesión, la densidad aparente es baja, alta porosidad y puede colapsarse irreversiblemente cuando se encuentran secos. Las propiedades químicas incluyen una alta afinidad para la materia orgánica, la carga dependiente de pH, una fuerza iónica débil para la absorción y altas capacidades de fijación de fosfatos (Wada 1985). Boul *et al.* (1989), señalaron que algunos suelos de este orden están en equilibrio con su ambiente y no maduran hasta que ese ambiente cambie.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Mapeo geomorfológico

El presente estudio se realizó con base en la metodología propuesta por el ITC para levantamientos geomorfológicos (Verstappen y van Zuidam, 1991). Para ello se hizo una revisión bibliográfica y cartográfica, se consultaron las cartas topográfica y otras temáticas Milpa Alta (E14-A49) a escala 1:50,000 (INEGI, 1984a, 1984b, 1984c, 1984d), que sirvieron de base en la elaboración de los mapas del área de estudio. La información bibliográfica seleccionada comprendió las características del área (geología, clima, hidrología, suelos, vegetación y aspectos socioeconómicos) para la descripción del marco geográfico. La búsqueda se concentró en datos sobre la delegación Milpa Alta, estudios relacionados con la Sierra Chichinautzin y con información teórico-conceptual acerca de las características del relieve y su relación funcional con el suelo.

Se obtuvieron las fotografías aéreas pancromáticas a escala 1:20,000 (INEGI, 1970) y se delimitaron las unidades geomorfológicas-morfogenéticas (UGM) de la ladera norte del volcán Tláloc. Las fotografías se georreferenciaron y se les aplicó una corrección fotogramétrica, posteriormente se digitizaron con apoyo de un Sistema de Información Geográfica, utilizando el programa ILWIS (por sus siglas en inglés *Integrated Land and Water Information System*). Una vez definidos los polígonos se obtuvo un mapa de unidades geomorfológico-morfogenéticas, considerando el origen, tipo de relieve, edad/ litología y geometría del relieve (Tapia-Varela y López-Blanco, 2002) (Figura 3.1).

3.2 Delimitación del área de estudio.

Utilizando las fotografías aéreas y la carta topográfica se delimitó previamente el área de estudio, con base en la fotointerpretación y en las características del ambiente biofísico observado. Se elaboró un mosaico fotográfico y el límite de la ladera norte quedó comprendido entre el poblado de Milpa Alta hacia el norte, el cono cinerítico del Volcán Tláloc hacia el sur y el límite este y oeste quedaron evidenciados por los flujos de lava

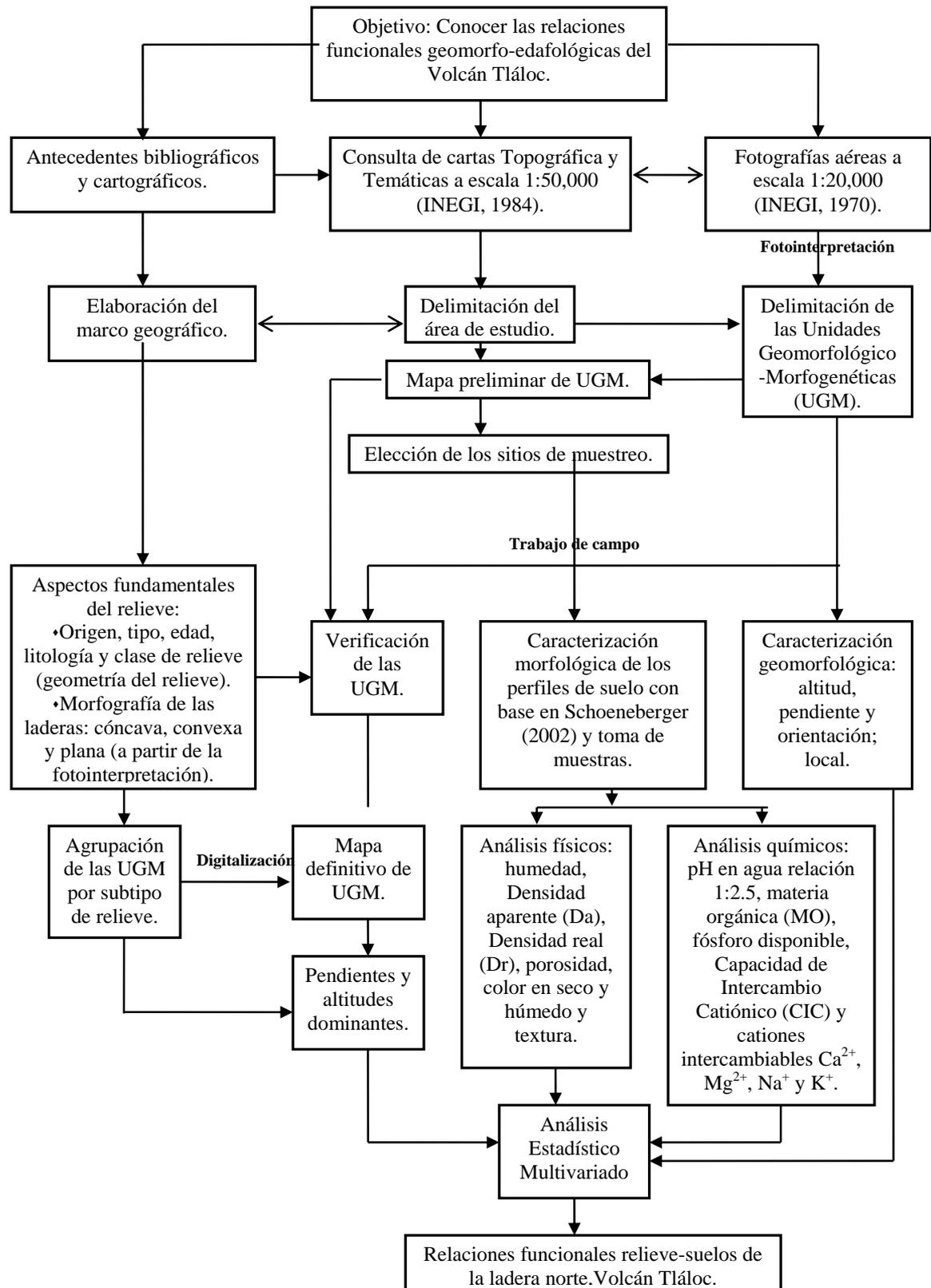


Figura 3.1. Diagrama metodológico para analizar la relación funcional entre el relieve y los suelos.

Tlacotenco y Ocusacayo respectivamente. De igual manera el fotomosaico sirvió para seleccionar los pares estereoscópicos utilizados en la elaboración del mapa preliminar de unidades geomorfológico-morfogenéticas (UGM), mediante técnicas de fotointerpretación. En las cartas temáticas, se tomó como referencia esta delimitación para elaborar los mapas correspondientes al marco geográfico, a partir del SIG, por lo que se escanearon y se digitizaron, el mapa geológico y la carta edafológica.

3.3 Delimitación de las Unidades Geomorfológicas Morfogenéticas (UGM)

En las fotografías aéreas se delimitaron las unidades geomorfológicas-morfogenéticas (UGM) de la ladera norte del volcán Tláloc, mediante trabajo de fotointerpretación, para lo cual se utilizó un estereoscopio de espejos y los pares estereoscópicos previamente elegidos (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Material fotográfico utilizado en la fotointerpretación de las UGM.

No. de línea	No. de fotografía	Pares estereoscópicos	Escala
35	De la 31 a la 33	31-32	1:20,000
36	De la 18 a la 21	18-19 y 20-21	1:20,000
37	De la 06 a la 10	07-08 y 09-10	1:20,000
38	De la 39 a la 42	39-40 y 41-42	1:20,000

Fuente: INEGI (1970).

Para definir los límites de las UGM, de acuerdo a la escala de las fotografías aéreas, se consideraron los cambios de pendiente, de litología, del uso de suelo y de la cobertura vegetal; además la posición de la ladera, su forma y la base geológica (a escala 1:50,000). Con respecto al relieve volcánico fueron visualizados por una parte, la variación de tonos de gris a gris oscuro y por otra el predominio de formas cónicas de menor tamaño con respecto a la principal (Tláloc), predominando también los flujos lávicos. Cabe destacar que la cobertura vegetal observada fue de bosque de pino y pastizal principalmente; con respecto al uso de suelo el área de estudio se diferenció en forestal y agrícola.

La fotointerpretación se inició trazando las unidades geomorfológico-morfogenéticas, utilizando acetatos sobrepuestos a las fotografías, donde se reconocieron por su origen, forma y temporalidad. Se agruparon en subtipos de relieve considerando la ruptura de la pendiente, principalmente, y finalmente se reconocieron tres tipos de relieve. Como ya se mencionó, se reconocieron geoformas volcánicas de menor tamaño, reportadas en la carta geológica, que debido a la escala de las fotografías aéreas, se incluyeron como parte de las UGM.

El trabajo de fotointerpretación también se enfatizó en diferenciar las unidades geomorfológico-morfogenéticas, de acuerdo a su morfografía longitudinal y transversal, principalmente porque, por un lado la morfografía que presentan las distintas laderas en el paisaje geomorfológico es heterogénea, lo que implica que el desarrollo del suelo esté en función del depósito de materiales y el drenaje superficial, que influyen directamente en sus propiedades físicas y químicas.

3.4 Clasificación de las UGM

La clasificación de las UGM fue con base en el criterio principal de homogeneidad relativa y a su caracterización en cuatro aspectos fundamentales del relieve: 1) origen general y específico; 2) tipos generales y específicos (planicies, piedemontes, lomeríos y laderas de montaña); 3) temporalidad (edades de las rocas, de las estructuras y de las formas); y 4) geometría del relieve (parámetros morfométricos principales por unidad) (Tapia-Varela y López-Blanco, 2002). Cabe mencionar que el área de estudio queda comprendida entre dos de las edades en que se divide el periodo Cuaternario (Pleistoceno y Holoceno). Por lo que, este aspecto no sólo sirvió para particularizar las UGM, sino también para interpretar la relación que existe con el suelo en términos de desarrollo pedogenético. Se denominaron tipos generales de cono de escoria y específicos de laderas de montaña (interna y externa) y laderas de montaña de flujos lávicos (superior, media e inferior), tipos generales de piedemonte y específicos de piedemonte complejo (superior, medio, medio-inferior, inferior) e intermontano y por último, tipos generales y específicos de planicies aluviales, de cono de escoria e intermontanas.

3.5 Procesamiento en SIG de las UGM.

Al finalizar el trabajo de fotointerpretación, se transfirieron los trazos a una referencia cartográfica digital en el SIG. Se escanearon las siete fotografías aéreas, posteriormente se llevó a cabo la georreferenciación de las mismas en donde se señalaron puntos de control identificados en ortofotos a escala 1:20,000 (INEGI, 2000), con coordenadas geográficas y UTM, de los rasgos más relevantes (predominaron los límites culturales: parcelas y cruce de caminos y físicos: límite de flujos lávicos y árboles). Se aplicaron de 25 a 30 puntos, distribuidos homogéneamente en toda la imagen, en donde el error medio cuadrático más elevado fue de 0.5 píxeles.

Los segmentos de las UGM se digitizaron en pantalla y se obtuvo un mapa de segmentos. Después se verificaron los segmentos, tratando de que no quedaran segmentos abiertos, sobrepuestos, etc. Posteriormente se hizo un mapa de polígonos, a partir del mapa segmentos, los cuales se etiquetaron, de acuerdo con la leyenda, con lo que se obtuvo un mapa preliminar de UGM.

Por medio de métodos morfométricos se realizaron mapas específicos que ayudaron al análisis de la geomorfología del área de estudio. En el presente trabajo se utilizaron variables morfométricas que proporcionaron información útil para la comprensión de las posiciones de la ladera con respecto a los suelos: altimetría y pendientes del terreno.

Se realizó una revisión y delimitación preliminar de la ladera norte del Volcán Tláloc, en el modelo digital del terreno (MDT) de la Sierra Chichinautzin elaborado a partir de la digitización y procesamiento de las curvas de nivel (a escala 1:50,000) en el SIG y obtener a partir de éste y con ayuda de los distintos filtros digitales de las clases geométricas del relieve del área.

El mapa altimétrico es el inicial y uno de los más importantes ya que simplifica la comprensión de un mapa topográfico (Lugo, 1988). Este mapa consistió en definir a partir de la altura máxima y mínima, los intervalos de altitud para su definición, se tomó el valor más

bajo de los 2,300, hasta el más alto de los 3,700 m. Para elaborar este mapa, al MDT se le aplicó la función segmentación en clases (*Slicing*). Los intervalos se establecieron a partir de los valores máximos, mínimos y sus frecuencias, estos se obtuvieron por los valores dados por el SIG al MDT. Después se reclasificó dicho modelo, creando un nuevo dominio en el SIG, es decir, una nueva tabla de valores de intervalos de altitud, de los cuales resultó un mapa con trece intervalos altitudinales.

El mapa de pendientes se elaboró para determinar los intervalos de gradiente en las distintas posiciones de la ladera norte del Tláloc. Este tipo de cartografía consiste en transformar las distancias entre curvas de nivel a valores de pendiente (Lugo, 1988). Para la elaboración de este mapa, mediante SIG, también se tomó como base el MDT segmentado anteriormente, se aplicaron a éste, los filtros de convolución lineal llamados DFDX y DFDY, para los cuales se calcularon las diferencias de altitud de cada píxel consecutivo en el sentido de las coordenadas X y Y. Se hizo necesaria una clasificación de intervalos, tomando como referencia la división propuesta por Verstappen y van Zuidam (1991), utilizando criterios propios para clasificar la inclinación de las laderas con los valores dominantes que se presentan. Se obtuvo un mapa de pendientes con trece intervalos.

3.6 Elección de los sitios de muestreo de suelos

Una vez delimitadas las UGM, se realizaron recorridos de campo con el fin de verificarlas. Fueron elegidos siete subgrupos de UGM, en los cuales se analizaron los perfiles de suelo. Los sitios se seleccionaron a partir del mapa preliminar. Desde la superficie cumbral y pendiente abajo los subgrupos fueron: a) Endógeno volcánico-acumulativo de ladera de montaña externa del cono de escoria, b) Endógeno volcánico-acumulativo de ladera de montaña superior de flujos lávicos, c) Endógeno volcánico-acumulativo de ladera de montaña inferior de flujos lávicos, d) Principalmente endógeno y secundariamente exógeno acumulativo de piedemonte complejo medio, e) Principalmente endógeno y secundariamente exógeno acumulativo de piedemonte complejo medio inferior y d) Exógeno acumulativo de planicie aluvial. Por otra parte, mediante técnicas de fotointerpretación se situaron los puntos, considerando la importancia del medio biofísico. Las coordenadas UTM se tomaron del mapa preliminar y se

registraron para su búsqueda en campo con ayuda de un navegador de GPS (por sus siglas en inglés *Global Positioning System*).

3.7 Muestreo de suelos en campo.

Una vez localizados los puntos, se realizó un registro de las coordenadas UTM de cada perfil de muestreo, para elaborar un mapa de puntos en el SIG con la finalidad de representarlos en el mapa de subgrupos de UGM. Por otra parte se realizó una caracterización geomorfológica del sitio, la cual consistió en tomar la altitud; empleando un navegador de GPS, se registró la orientación local de la ladera usando una brújula y la pendiente local con un clisímetro. Mediante observaciones directas se consideraron tanto la morfografía local de la ladera, los procesos geomorfológicos de tipo exógeno, el tipo de roca, suelo, la situación hidrológica como la vegetación y el uso de suelo.

La descripción morfológica de los perfiles de suelo y la toma de muestras de los siete perfiles se realizó, cavando una calicata de poco menos de tres metros cúbicos, con respecto a la orientación de la ladera, asimismo se consideró la orientación del perfil observando la posición del sol al momento de realizar la calicata con el objetivo de elegir la pared con mayor iluminación. Utilizando una cinta métrica se midió la profundidad del perfil y se procedió a realizar la descripción morfológica considerando el manual de campo de Schoeneberger *et al.* (2002). Los suelos se clasificaron de acuerdo con la *World Reference Base* (FAO FAO-ISRIC-SICS, 1999), se colectaron muestras de 1.5 kg por horizonte de suelo para su análisis en laboratorio.

3.8 Análisis de laboratorio.

Las muestras se secaron durante cinco días, posteriormente fueron cernidas con un tamiz de 2 mm de apertura. Se les determinó el porcentaje de humedad por secado en estufa a peso constante. La densidad aparente (D_a) se estimó con el peso del suelo húmedo y seco obtenido de un cilindro de un volumen definido, la densidad real (D_r) por el método del picnómetro (*Soil Survey Staff*, 1999) y la porosidad fue estimada con el cociente entre la densidad real y la

densidad aparente (Brady, 1974). El color en seco y húmedo por comparación con las Tablas Munsell (1994) y la textura por el método de Bouyucos (SEMARNAT, 2002).

Por otra parte las propiedades químicas que se analizaron fueron: pH en agua relación 1:2.5 por el método del potenciómetro con electrodo de vidrio; materia orgánica (MO) (Walkley y Black, 1934), fósforo disponible por Bray 1 (SEMARNAT, 2002); Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y cationes intercambiables Ca^{2+} y Mg^{2+} (*Soil Survey Staff*, 1999) y Na^{+} y K^{+} intercambiables por fotometría de flama.

3.3 Análisis multivariado

Para determinar las relaciones funcionales biunívocas relieve-suelo, se aplicó un análisis de componentes principales (ACP, del programa SYSTAT Versión 9) (SPSS, 1998) de una base de datos de veinte variables (pendiente, altitud, profundidad, humedad, densidad aparente, densidad real, porosidad, arenas, limos, arcillas, pH, MO, Corg., CIC, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , PSB y P) con siete casos. Dichas variables se introdujeron al programa para lo cual fue necesario el arreglo de los datos en forma de matriz, de dos dimensiones (renglones y columnas). Inicialmente el procedimiento genera una estandarización de los datos y después se obtiene un conjunto de vectores por medio de la diagonalización de la matriz.

Obtenida esta matriz se generan los eigenvectores y los eigenvalores (Dallas, 1998). Los eigenvectores señalan el número de factores principales constituidos por sus eigenvalores o cargas estadísticas de las variables, siempre el primer factor explicará la mayor cantidad de varianza de los datos, siendo más importante que los demás (Salinas, 2005).

La máxima varianza de cada variable que compone a los factores denota el peso de las variables. Mientras su valor se acerque más a 1, la carga de la variable será alta y viceversa, por otro lado las cargas con valores negativos señalan un comportamiento inversamente proporcional a las variables de carga positiva.

Un criterio para determinar la dimensionalidad real del espacio en que caen los datos que contienen una matriz cualquiera, utilizado para este trabajo, fue el uso del método de gráfica de factores (Dallas, 1998). De esta forma los valores cercanos a 0 pueden ignorarse, así el número determinado, es el de eigenvectores mayores, que se localizan por arriba de la ruptura de pendiente en la gráfica.

Una vez resumidos los datos a través del ACP, se obtuvieron las variables de mayor peso dentro de los componentes determinados y se procedió a realizar un agrupamiento de los casos, por medio de un análisis de agrupamiento estadístico (*Cluster*).

Los resultados obtenidos por ambos métodos, producen nuevas variables, que son mostrados como una nueva matriz o de manera gráfica (dendrogramas y gráficas de factores), esto con la finalidad de obtener nuevas estructuras numéricas y gráficas que permitan visualizar la interpretación de las relaciones funcionales,

De acuerdo con los resultados de la metodología para analizar las relaciones funcionales entre el relieve y el suelo, se consideró la información bibliográfica para la interpretación de suelos derivados de cenizas volcánicas, de manera que se describió el comportamiento de cada horizonte para los siete perfiles, sobre todo de las propiedades de mayor peso, de acuerdo a la interpretación del análisis estadístico. Para esto se eligieron las propiedades de mayor importancia, se seleccionaron la profundidad, la densidad real, la porosidad, la textura; por parte de las propiedades físicas, el pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico por parte de las propiedades químicas.

Una vez considerados los puntos anteriores, se elaboró la discusión del trabajo, considerado el ambiente biofísico de cada subgrupo de UGM donde se realizó el perfil y la interpretación de las propiedades físicas y químicas, estableciendo así la relación funcional entre las propiedades del suelo con los subgrupos de UGM de laderas de montaña, piedemontes y planicies, con lo que finalmente se discutieron las relaciones funcionales de la ladera norte del Tlálloc.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Descripción de las Unidades Geomorfológico-Morfogenéticas (UGM)

Se obtuvieron 758 unidades geomorfológico-morfogenéticas (UGM) las cuales se agruparon en 13 subgrupos de relieve. Las UGM se caracterizan por ser de 1) Origen endógeno volcánico acumulativo, de andesita holocénica que corresponden a los subgrupos de a) Laderas de montaña internas de cono de escoria (*Lmice*), b) Laderas de montaña externas de cono de escoria (*Lmece*), c) Laderas de montaña superior de flujos lávicos (*Lmsfl*), d) Laderas de montaña media de flujos lávicos (*Lmmfl*), e) Laderas de montaña inferior de flujos lávicos (*Lmifl*); 2) de origen complejo, principalmente endógeno acumulativo de flujos lávicos de andesita y secundariamente exógeno acumulativo aluvial con cubierta reciente pleistoholocénica, que corresponden a los subgrupos de f) Piedemonte complejo superior (*Pmcs*), g) Piedemonte complejo medio (*Pmcm*), h) Piedemonte complejo medio-inferior (*Pmcmi*), i) Piedemonte complejo inferior (*Pmci*); j) de origen exógeno acumulativo aluvial de Piedemonte local intermontano (*Pmlin*) de andesita pleistocénica y 3) de origen exógeno acumulativo aluvial de depósitos no consolidados de ceniza volcánica sobre andesita pleistoholocénica y corresponden a los subgrupos k) Planicie aluvial (*Pal*), l) Planicie interna de cono de escoria (*Pice*) y m) Planicie local intermontana (*Plin*) en la Figura 4.1 están representados los subgrupos de UGM y los sitios de muestreo y en la Tabla 4.1 se presentan la características morfogenética de cada subgrupo.

4.1.1 Grupos de laderas de montaña

De origen endógeno volcánico-acumulativo de andesita holocénica que corresponden a las laderas de montaña interna y externa de cono de escoria y a las laderas de montaña de flujos lávicos superior, media e inferior (*Lmice*, *Lmece*, *Lmsfl*, *Lmmfl* y *Lmifl*). Su forma dominante longitudinalmente es plana y transversalmente convexa.

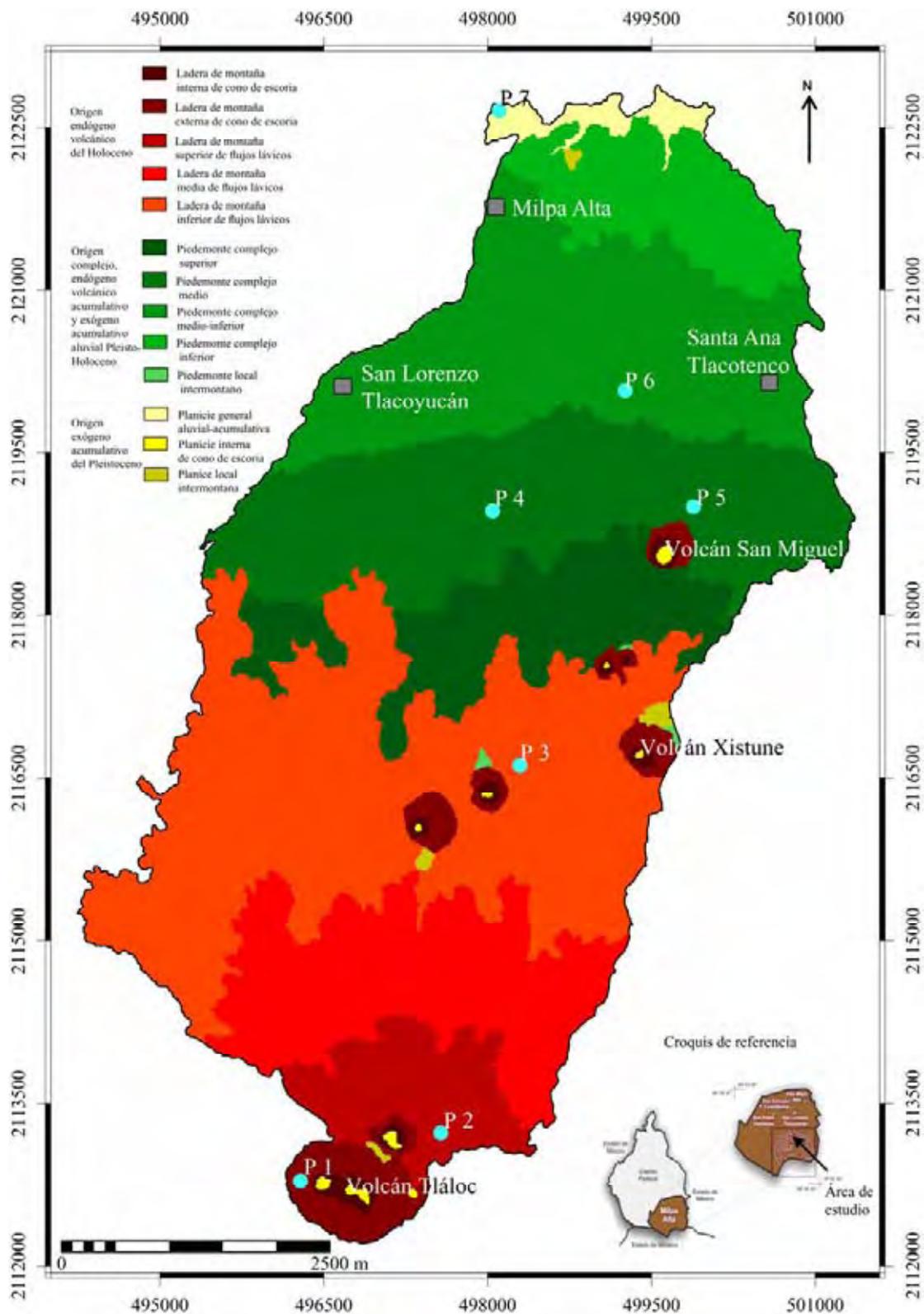


Figura 4.1 Clasificación de los subgrupos de UGM y sitios de muestreo de suelos, indicados por la letra P (perfil), seguidos por un número.

Tabla 4.1 Características generales de las UGM de la ladera norte del Volcán Tláloc

UGM	Origen	Tipo de relieve	Temporalidad (miles de años)	Litología	Clases del relieve		
					P.D (°)	A.D (m)	M.D (L/T)
<i>Lmice</i>	Endógeno volcánico acumulativo	Ladera interna de cono de escoria	Holoceno 2.4 a 8.4 +/- 0.7	Flujos lávicos de andesita	16-35	3,650-3,700	pl/cx
<i>Lmece</i>	Endógeno volcánico acumulativo	Ladera externa de cono de escoria	Holoceno 2.4 a 8.4 +/- 0.7	Flujos lávicos de andesita	16-35	3,350-3,600	pl/cx
<i>Lmsfl</i>	Endógeno volcánico acumulativo	Ladera de montaña superior de flujos lávicos	Holoceno 2.4 a 8.4 +/- 0.7	Flujos lávicos de andesita	8-16	3,450-3,500	pl/cx
<i>Lmmfl</i>	Endógeno volcánico acumulativo	Ladera de montaña media de flujos lávicos	Holoceno 2.4 a 8.4 +/- 0.7	Flujos lávicos de andesita	8-16	3,300-3,350	pl/cx
<i>Lmifl</i>	Endógeno volcánico acumulativo	Ladera de montaña inferior de flujos lávicos	Holoceno 2.4 a 8.4 +/- 0.7	Flujos lávicos de andesita	8-16	3,050-3,100	pl/cx
<i>Pmcs</i>	Complejo: principalmente endógeno acumulativo y secundariamente exógeno acumulativo aluvial	Piedemonte complejo superior	Pleisto-Holocénico 38.6+/- 3.2 2.4 a 8.4 +/- 0.7	Flujos lávicos de andesita con cubierta aluvial reciente	4-8	2,900-2,950	pl/cx
<i>Pmcm</i>	Complejo: principalmente endógeno acumulativo y secundariamente exógeno acumulativo aluvial	Piedemonte complejo medio	Pleisto-Holocénico 38.6+/- 3.2 2.4 a 8.4 +/- 0.7	Flujos lávicos de andesita con cubierta aluvial reciente	8-16	2,750-2,800	pl/cx
<i>Pmcmi</i>	Complejo: principalmente endógeno acumulativo y secundariamente exógeno acumulativo aluvial	Piedemonte complejo medio inferior	Pleisto-Holocénico 38.6+/- 3.2 2.4 a 8.4 +/- 0.7	Flujos lávicos de andesita con cubierta aluvial reciente de depósitos piroclásticos	8-16	2,550-2,600	pl/cx
<i>Pmci</i>	Complejo: principalmente endógeno acumulativo y secundariamente exógeno acumulativo aluvial	Piedemonte complejo inferior	Pleisto-Holocénico 38.6+/- 3.2 2.4 a 8.4 +/- 0.7	Flujos lávicos de andesita con cubierta aluvial reciente	4-8	2,350-2,400	pl/cx
<i>Pmin</i>	Complejo: principalmente endógeno y secundariamente exógeno acumulativo	Piedemonte local intermontano	Pleisto-Holocénico 38.6+/- 3.2 2.4 a 8.4 +/- 0.7	Depósitos piroclásticos andesítico-basálticos	8-16	3,050-3,100	pl/cx
<i>Pal</i>	Exógeno acumulativo aluvial	Planicie aluvial	Pleistoceno 38.6+/- 3.2	Depósitos piroclásticos no consolidados de ceniza volcánica sobre andesitas	0-2	2,300-2,350	pl/pl
<i>Pice</i>	Exógeno acumulativo aluvial	Planicie interna de cono de escoria	Holoceno 2.4 a 8.4 +/- 0.7	Depósitos piroclásticos no consolidados de ceniza volcánica sobre andesitas	0	3,600-3,650	pl/pl
<i>Plin</i>	Exógeno acumulativo aluvial	Planicie local intermontana	Pleisto-Holocénico 38.6+/- 3.2 2.4 a 8.4 +/- 0.7	Depósitos piroclásticos no consolidados de ceniza volcánica sobre andesitas	4-8	2,950-3,000	pl/cx

P.D: Pendiente dominante, A.D: Altitud dominante, M.D.: Morfografía dominante, L/T: Longitudinal/Transversal; cv: cóncava; cx: convexa; pl: plana.

A estos subgrupos de unidades, les corresponde un clima semifrío-subhúmedo con abundantes lluvias en verano C (E) (w_2), con una temperatura media anual de 12°C y una precipitación anual de 1,250 mm (García, 1988). INEGI (1984a) especifica que el tipo de suelo en esta área es Regosol eútrico con asociación secundaria de Andosol que corresponde a las laderas de montaña internas y externas de cono de escoria; en cambio la superficie de las unidades de ladera de montaña de flujos lávicos está cubierta por Leptosol en asociación con Andosol. La vegetación está representada por pastizal de los géneros *Festuca* y *Muhlenbergia*, bosque de *Pinus hartwegii*, *Pinus montezumae* y *Alnus* sp. y el uso del suelo es forestal. A continuación se describen las características de los subgrupos de UGM de laderas de montaña.

a) *Subgrupo de laderas de montaña internas de cono de escoria de andesita pleistoholocénica (Lmice)*. La pendiente se encuentra en un intervalo que va de 16 a 35°, con una variación altitudinal de los 3,650 a 3,700 m; representan una superficie de 30 ha, en los que se definieron 10 UGM, que corresponden al Volcán Tláloc de temporalidad holocénica y a los conos de los volcanes Xistunes I, II, III, V y San Miguel, de temporalidad pleistocénica. Los procesos geomorfológicos dominantes son los erosivos hídricos de flujo laminar y concentrado.

b) *Subgrupo de laderas de montaña externas de cono de escoria de andesita pleistoholocénica (Lmece)*. El intervalo de pendiente es de 16 a 35°, con altitudes entre los 3,550 y 3,600 m, lo que cubre una superficie de 135 ha. Se definieron veintidós unidades, distribuidas en las laderas de montaña externas del Volcán Tláloc de temporalidad holocénica y siete conos secundarios entre ellos los cuatro Xistunes y el volcán San Miguel de temporalidad pleistocénica. En este subgrupo se presentan procesos gravitacionales de flujo de derrubios y erosivos, principalmente hídricos, de flujo laminar y concentrado formando cauces relativamente profundos.

c) *Subgrupo de laderas de montaña superior de flujos lávicos de andesita holocénica (Lmsfl)*. Se definieron 62 unidades de relieve, las cuales tienen un intervalo de pendiente que va de 8 a 16°, entre los 3,450 y los 3,500 m de altitud en una superficie de 193 ha. Los procesos geomorfológicos que se presentan en esta área son acumulativos y erosivos; domina la

acumulación en las superficies cóncavas que se forman entre los escarpes de los flujos lávicos, favoreciendo el desarrollo del suelo. Los procesos geomorfológicos que se presentan son erosivos hídricos de flujo laminar.

d) Subgrupo ladera de montaña media de flujos lávicos de andesita holocénica (Lmmfl). Se definieron 122 unidades que ocupan una superficie de 469 ha, las cuales tienen un intervalo de pendiente que va de 8 a 16°, en las altitudes que va de 3,300 a 3,350 m. Los procesos erosivos que se presentan, son hídricos de flujo laminar. Está presente la acumulación entre las concavidades que se forman entre los límites litológicos y aunado a las condiciones de temperatura y precipitación, en los que el desarrollo del suelo se ve favorecido (Martin, 1980).

e) Subgrupo de laderas de montaña inferior de flujos lávicos de andesita holocénica (Lmifl). Se obtuvieron 232 UGM, siendo el subgrupo de laderas más extenso en el área de estudio, ocupando una superficie de 1,109 ha, donde la pendiente se encuentra en un intervalo que va de los 8° a los 16° en un intervalo altitudinal de 3,050 a 3,100 m. Se presentan procesos geomorfológicos de acumulación en las concavidades de los límites litológicos y de erosión hídrica de flujo laminar.

4.1.2 Grupo de piedemontes

De origen complejo, principalmente endógeno acumulativo de flujos lávicos de andesita y secundariamente exógeno acumulativo aluvial con cubierta reciente de temporalidad pleistoholocénica y por su posición topográfica se delimitaron en superior, medio, medio-inferior e inferior. Su origen se determinó a partir del trabajo de fotointerpretación y posteriormente se verificó en campo. En la Figura 4.2 se observa el límite litológico de los flujos lávicos de las laderas de montaña inferiores (en color gris oscuro) y la continuidad de dichos flujos hacia el norte, correspondientes al piedemonte complejo, donde se observó, que en el límite litológico entre un flujo lávico y otro se presentan procesos erosivos hídricos de flujo concentrado formando cauces relativamente profundos, sin embargo el relieve está dominado por los procesos erosivos de flujo laminar. Su forma dominante longitudinalmente es plana y transversalmente convexa.

El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano Cb(w₁)w(i)g con una temperatura media anual de 14°C y una precipitación anual de 900 mm. El suelo es Phaeozem háplico (INEGI, 1984);. La vegetación está representada por relictos de bosque de *Quercus* sp., así como de *Buddleia cordata*, *Lupinus polyphyllus*, gramíneas de los géneros *Festuca* y *Muhlenbergia*. También se encuentran árboles frutales como *Crataegus mexicana* y *Prunus serotina*. El uso de suelo es de agricultura de temporal con cultivo de nopal y verdura. A continuación se presentan las características de los subgrupos de UGM de piedemontes.



Figura 4.2 Fotografía aérea, escala 1:20,000, en la que se muestran los flujos lávicos de andesita holocénica de las laderas de montaña inferior (A), posteriores al piedemonte complejo con cubierta aluvial reciente pleistoholocénico (B), utilizado para el cultivo de maíz y nopal.

f) *Subgrupo de piedemonte complejo superior de flujos lávicos de andesita con cubierta aluvial reciente pleisto-holocénica (Pmcs)*. Se definieron 35 UGM de *Pmcs* en una superficie de 338 ha, en las cuales, su pendiente va de 4 a 8°, en un intervalo altitudinal de 2,900 a 2,950 m; la pendiente es ligeramente inclinada en comparación con los siguientes subgrupos de unidades de piedemonte complejo, favoreciendo la acumulación de materiales piroclásticos retrabajados provenientes del transporte de las laderas de montaña inferior. Los procesos geomorfológicos a nivel general son acumulativos, y a nivel local son erosivos hídricos de flujo laminar y concentrado y eólicos estacionales, presentándose en la temporada seca del año (enero-abril).

g) *Subgrupo de piedemonte complejo medio de flujos lávicos de andesita con cubierta aluvial reciente pleisto-holocénica (Pmcm)*. A este subgrupo pertenecen 106 UGM en una superficie de 669 ha, la pendiente va de los 8 a los 16°, en un intervalo altitudinal de 2,750 a 2,800 m. Se presentan procesos geomorfológicos de acumulación y de erosión hídrica de flujo laminar y concentrado, además de eólicos estacionales (a partir de la temporada seca del año de enero a abril), el microrelieve presenta surcos y ondulaciones debido a la actividad agrícola y la presencia de magueyes evita la erosión del suelo.

h) *Subgrupo de piedemonte complejo medio-inferior de flujos lávicos de andesita con cubierta aluvial reciente pleisto-holocénica (Pmcmi)*. Se definieron 107 UGM en una superficie de 687 ha, con una pendiente que va de los 8 a los 16°, entre las altitudes de 2,550 a 2,600 m. Se presentan procesos de acumulación a nivel general y erosivos a nivel local, los dominantes son hídricos de flujo laminar y concentrado y los eólicos estacionales, a partir de la mitad seca del año. Por otra parte el microrelieve está constituido por surcos, terrazas y ondulaciones.

i) *Subgrupo de piedemonte complejo inferior de flujos lávicos de andesita con cubierta aluvial reciente pleisto-holocénicos (Pmci)*. Se caracterizaron 41 UGM con una superficie de 240 ha, la pendiente va de los 4 a los 8° y el intervalo altitudinal es de 2,350 a 2,400 m. Se presentan procesos geomorfológicos acumulativos y de erosión hídrica de flujo laminar y concentrado, además de eólicos estacionales (a partir de la temporada seca del año), el relieve presenta modificaciones influenciado por la actividad agrícola.

j) *Subgrupo de piedemonte local intermontano (Pmlin)*. De origen exógeno acumulativo aluvial de piedemonte local intermontano de depósitos piroclásticos andesítico-basálticos del pleistoceno. Se obtuvieron tres unidades, las cuales se encuentran contiguas a dos de los conos Xistunes y una al Volcán San Miguel, ocupando una superficie de 3 ha. La pendiente se encuentra entre los 8 y los 16°, con un intervalo altitudinal de 3,050 a 3,100 m, los procesos geomorfológicos dominantes son acumulativos.

3.1.3 Grupo de planicies

Son de origen exógeno acumulativo aluvial de planicies generales, locales intermontanas e internas de cono de escoria (*Pal*, *Plin* y *Pice*), de depósitos no consolidados como ceniza volcánica sobre andesitas, donde su forma en ambos sentidos es plana. Las *Pice* son de edad holocénica, en comparación con las *Pal* y las *Plin* que son del Pleistoceno. En las *Pice*, se presentan las mismas condiciones climáticas, edáficas y de vegetación, correspondientes a los subgrupos de *Lmice*, mientras que en las *Pal* y las *Plin* el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano Cb(w₁)w(i)g con una temperatura media anual de 15.3°C y una precipitación anual de 688 mm. De acuerdo con INEGI (1984), el suelo es *Phaeozem* háplico en donde se práctica la agricultura de temporal, con cultivos de nopal verdura y maíz, especialmente en las *Pal* y las *Plin*. A continuación se presentan las características de los subgrupos de UGM de planicies

k) *Subgrupo de planicies acumulativas aluviales generales (Pal)*. Este subgrupo presenta una pendiente que va de 0 a 2°, se encuentra en un intervalo altitudinal de 2,300 a 2,350 m y ocupa una superficie de 50 ha, que representa el 1% del total del área de estudio. Los procesos geomorfológicos que se presentan son erosivos, hídricos de flujo laminar y eólicos estacionales, a partir de la temporada seca del año (enero-abril).

l) *Subgrupo de planicies locales intermontanas (Plin)*. Se diferenciaron cuatro unidades con pendientes de 4 a 8°, un intervalo altitudinal de 2,900 a 3,000 m en una superficie de 12 ha. Los procesos geomorfológicos dominantes son de erosivos hídricos de flujo laminar.

m) *Subgrupo de planicies aluviales internas de cono de escoria (Pice)*. Se definieron nueve unidades, distribuidas en las planicies correspondientes a los volcanes Tláloc, Xistunes y San Miguel. La pendiente predominante es 0°, el intervalo altitudinal de las planicies del Volcán Tláloc es de 3,600 a 3,650 m, este subgrupo representa una superficie de 9 ha. Los procesos geomorfológicos que se presentan son erosivos hídricos de flujo laminar.

4.2. Descripción morfológica, propiedades físicas y químicas de los perfiles de suelo.

Los perfiles de muestreo de suelo se encuentran en: el sitio 1, corresponde al subgrupo de origen endógeno volcánico acumulativo de laderas de montaña externa de cono de escoria de andesita holocénica (*Lmece*), el 2 corresponde al subgrupo de origen endógeno volcánico acumulativo de laderas de montaña superior de flujos lávicos de andesita holocénica (*Lmsfl*), el sitio 3, al subgrupo de origen endógeno volcánico acumulativo de laderas de montaña inferior de flujos lávicos de andesita holocénica (*Lmifl*), los sitios 4 y 5, corresponden al subgrupo de origen complejo principalmente endógeno volcánico-acumulativo de flujos lávicos de andesita pleistocénica y secundariamente exógeno acumulativo aluvial de piedemonte medio con cubierta reciente pleisto-holocénica (*Pmcm*), el sitio 6 que corresponde al subgrupo de origen complejo principalmente endógeno acumulativo de flujos lávicos de andesita pleistocénica y secundariamente exógeno acumulativo aluvial de piedemonte medio-inferior con cubierta reciente pleisto-holocénica (*Pmcmi*) y el sitio 7 que corresponde al subgrupo de origen exógeno acumulativo aluvial de planicie general de depósitos no consolidados de ceniza volcánica sobre andesita pleistocénica (*Pal*). En la Tabla 4.2 se muestran los parámetros cualitativos y cuantitativos de cada subgrupo de relieve, de la caracterización geomorfológica en campo y en la Figura 4.3 se presentan los subgrupos y los perfiles, indicando el número de cada uno a lo largo de la ladera en un perfil topográfico.

Tabla 4.2 Caracterización geomorfológica de los sitios de muestreo de suelo

Perfil	UGM	Altitud	Orientación	Pendiente	Morfografía*	Procesos geomorfológicos dominantes	Tipo de roca	Suelo	Uso de suelo y vegetación
1	<i>Lmece</i>	3,642	S 50° W	28°	pl/cx	Gravitacionales y erosivos, hídricos de flujo laminar y concentrado	Fragmentos de roca y depósitos piroclásticos (andesita-basáltica)	Andosol	Pastizal de los géneros <i>Festuca</i> y <i>Muhlenbergia</i>
2	<i>Lmsfl</i>	3,520	S 9° E	2°	pl/cv	Erosivos hídricos de flujo laminar	Flujos lávicos de andesita cubiertos de depósitos piroclásticos	Andosol	Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> y pastizal de los géneros <i>Festuca</i> y <i>Muhlenbergia</i>
3	<i>Lmifl</i>	3,160	S 7° E	4°	pl/cv	Erosivos hídricos de flujo laminar	Flujos lávicos de andesita cubiertos de depósitos piroclásticos	Andosol	Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> y <i>Alnus</i> sp., pastizal de los géneros <i>Festuca</i> y <i>Muhlenbergia</i>
4	<i>Pmcm</i>	2,834	N 28° W	10°	pl/cx	Erosivos hídricos de flujo laminar y eólicos estacionales (a partir de la mitad seca del año)	Flujos lávicos de andesita y con cubierta aluvial reciente	Phaeozem mólico	Agricultura de temporal con cultivo de nopal verdura y bosque <i>Quercus</i> sp. y <i>Buddleia cordata</i> .
5	<i>Pmcm</i>	2,762	N 5° E	11°	pl/cx	Erosivos hídricos de flujo laminar, eólicos estacionales y antrópicos, modificado por surcos y ondulaciones.	Flujos lávicos de andesita y con cubierta aluvial reciente	Phaeozem háplico	Agricultura de temporal con cultivo de nopal verdura y Bosque de <i>Quercus</i> sp. y las especies <i>Buddleia cordata</i> , <i>Lupinus</i> sp.
6	<i>Pmcmi</i>	2,645	N 45° W	6°	pl/cv	Erosivos hídricos de flujo laminar. Influencia antrópica debido a la presencia de terrazas agrícolas	Flujos lávicos de andesita y con cubierta aluvial reciente	Regosol	Área agrícola en descanso y relictos de bosque de <i>Quercus</i> sp. y de la especie <i>Buddleia cordata</i>
7	<i>Pal</i>	2,372	S 75° E	1°	pl/cv	Erosivos hídricos de flujo laminar y eólicos estacionales (a partir de la mitad seca del año)	Depósitos piroclásticos no consolidados de ceniza volcánica sobre andesita	Regosol	Área agricultura con relictos de la especie <i>Schinus molle</i>

*L/T: Longitudinal/Transversal; cv: cóncava; cx: convexa; pl: plana

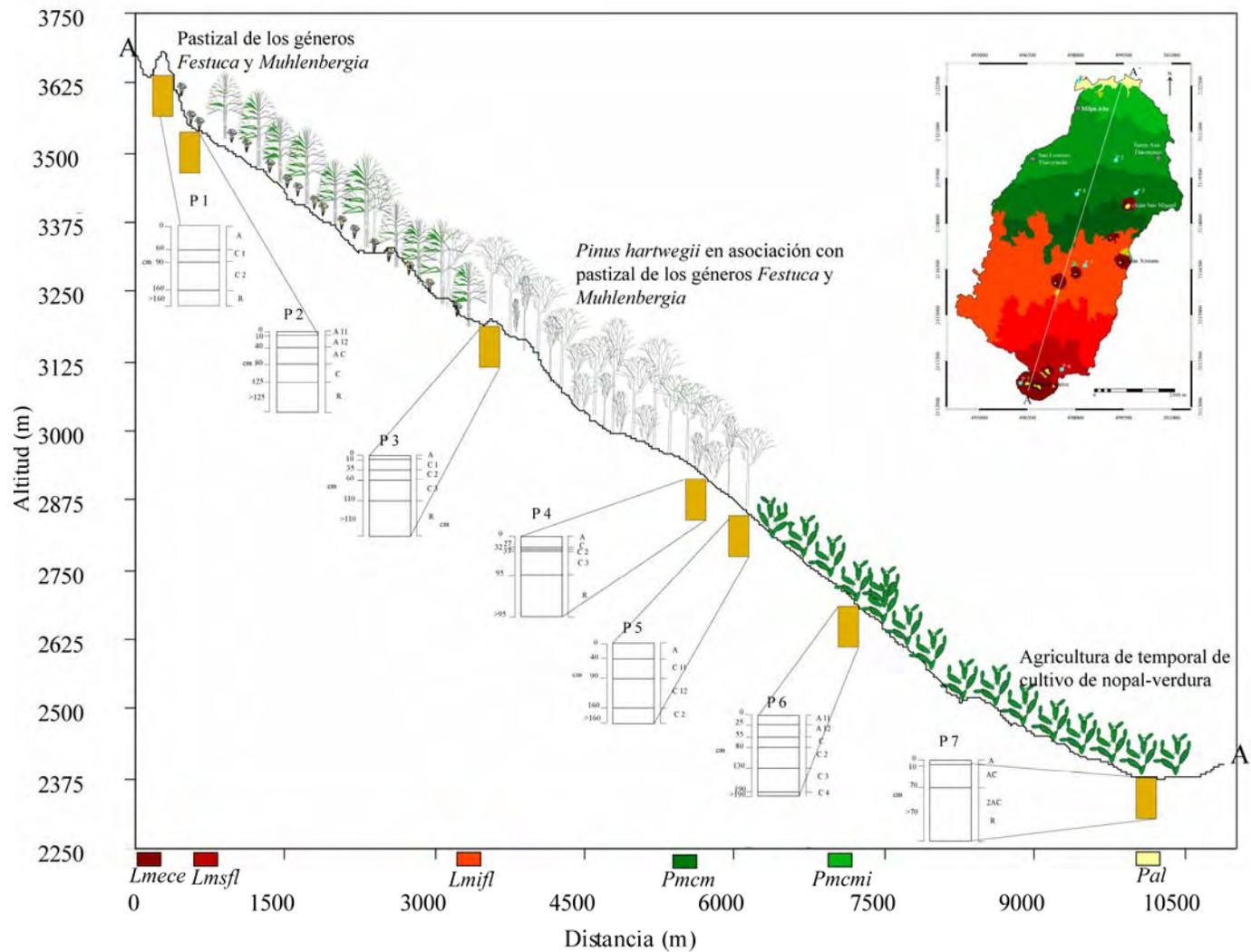


Figura 4.3 Perfil topográfico compuesto de los sitios de muestreo de suelo y la vegetación relacionados con la posición en la ladera: *Lmece*- Ladera de montaña externa de cono de escoria; *Lmsfl*-Ladera de montaña superior de flujos lávicos; *Lmifl*- Ladera de montaña inferior de flujos lávicos; *Pmcm*- Piedemonte complejo medio; *Pmcmi*- Piedemonte complejo medio inferior y *Pal*- Planicie aluvial.

4.2.1. Perfil 1. Volcán Tláloc

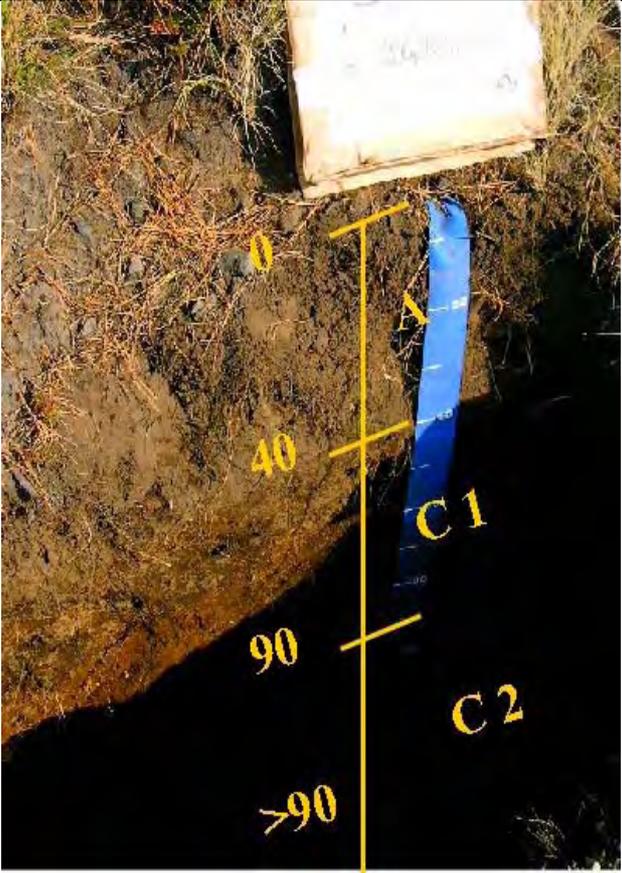
Este perfil se localiza en el subgrupo de *Lmece* a una altitud de 3,642 m, donde el material parental del suelo está constituido de depósitos piroclásticos, como ceniza volcánica, sobre andesita. El sitio presenta una inclinación de 28°, su morfografía en sentido transversal es plana y longitudinal es convexa. Se presentan procesos geomorfológicos gravitacionales de flujo de detritos y erosivos hídricos de flujo laminar y concentrado. La vegetación corresponde a un bosque de *Pinus hartwegii* en asociación con pastizal de los géneros *Festuca* y *Muhlenbergia*. En campo el suelo se clasificó como un Andosol de acuerdo a la *World Reference Base* (FAO-ISRIC-ISSS, 1999) (Tabla 4.3 y 4.4).

Propiedades físicas y químicas del suelo (P1)

El contenido de humedad de los horizontes se considera bajo para este perfil, atribuible al grado de pendiente y por lo tanto a los procesos geomorfológicos erosivos (flujo concentrado y laminar); la densidad aparente es baja y se incrementa con la profundidad, debido a que los suelos con partículas de arena tendrán altos valores de densidad aparente (Buckman y Brady, 1977). La porosidad en los horizontes A y C1 es >50%, debido al contenido de materia orgánica, a diferencia del C2, donde es de 30% de espacio poroso, cifra que corresponde a un suelo compactado (Buckman y Brady, 1977). El horizonte A presenta una textura migajón-arenosa, a diferencia de la textura arena-migajosa y arenosa que corresponden a los horizontes C1 y C2 respectivamente (Tabla 4.5).

El material del perfil es generalmente, ácido; esta acidez se atribuye primero a la presencia de aluminio proveniente de la hidrólisis de compuestos alofánicos y, luego, a la cantidad de acículas de *Pinus* sp. que son potencialmente acidificantes (Shoji *et al.*, 1993), por lo que su contenido de materia orgánica y carbono orgánico es alto para el horizonte A (Tabla 4.6).

Tabla 4.3 Morfología de los horizontes del perfil 1

	Descripción
	<p>A (0-60 cm). Es de color pardo grisáceo muy oscuro (2.5Y 3/2) en seco y negro (10YR 2/1) en húmedo, su textura migajosa, el material es de consistencia blanda en seco y friable en húmedo, ligeramente adhesivo y plástico, su estructura es granular (esta dada por las raíces) débilmente desarrollada, de porosidad frecuente (50 a 200 por dm^2) muy finos (0.075 a 1 mm), dentro y fuera de los agregados, raíces comunes (10 a 100 por 3 dm^2) de diámetro fino (<1 mm). Bien drenado.</p> <p>C 1 (60-90 cm). Su color es pardo olivo (2.5 Y 4/4) en seco y pardo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo, posee una textura limo-arenosa, consistencia suelta en seco y muy friable en húmedo, el material es ligeramente adhesivo y plástico, estructura poliédrica subangular débilmente desarrollada, poros frecuentes (50 a 200 por dm^2) de tamaño fino (1 a 2 mm), dentro de los agregados y vesiculares, raíces raras (3 a 5 por 3 dm^2) y finas (<1 mm). Bien drenado.</p> <p>C 2 (90-160 cm). Es de color pardo olivo claro (2.5Y 5/4) en seco y pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); su textura es arenosa, consistencia blanda en seco y muy friable en húmedo, el material es ligeramente adhesivo y plástico, su estructura poliédrica subangular débilmente desarrollada, presenta muy pocos poros (1 por dm^2), de tamaño de microporos (<0.075 mm), dentro de los agregados y vesiculares, raíces raras (3 a 5 por 3 dm^2) y finas (<1 mm de diámetro). Bien drenado.</p>

	<p><i>PI.</i> Panorámica de la ladera de montaña externa de cono de escoria, en la que se observa el gradiente y la cobertura del pastizal en la capa suprayacente de suelo</p>
---	---

Tabla 4.4 Descripción morfológica de los perfiles de las UGM de laderas de montaña del volcán Tláloc

Hor.	Prof.	Consistencia ^a		Color		Estructura ^b	Pedregosidad (%)	Raíces ^c	Porosidad ^d
		Seco	Húmedo	Seco	Húmedo				
<i>Lmice (P 1) Andosol, pendiente 28°, 3,642 m</i>									
A	0-60	B	F	2.5Y 3/2	10YR 2/1	GR, DD	<1	4, f	3, mf, vs
C 1	60-90	S	F	2.5Y 4/4	10YR2/2	PSAN, DD	1	2, f	3, fm vs
C 2	90-160	B	MF	2.5Y 5/4	10YR 3/2	PSAN, DD	1-5	2,f	1, mcp, vs
<i>Lmsfl (P 2) Andosol, pendiente 2°, 3,520 m</i>									
A 11	0-10	S	MF	10YR 3/1	10YR 2/1	PSAN,DD	<1	4, f	4, mf, vs
A 12	10-40	B	MF	10YR 3/2	10YR 2/1	PSAN,DD	<1	3, f	4, mcp, vs
AC	40-80	B	MF	10YR 4/2	10YR 2/2	PSAN,DD	<1	2, f	4, mcp, vs
C	80-125	B	MF	10YR 4/3	10YR 3/2	PSAN,DD	<1	1, d	4, mcp, vs
<i>Lmifl (P 3) Andosol, pendiente 4°, 3,160 m</i>									
A	0-10	B	F	10YR 4/2	10YR 2/2	PSAN,DD	<1	4, d	3, mf,f, vs
C 1	10-35	B	F	10YR 5/2	10YR3/3	PSAN,DD	<1	4, d	3, f, vs, int
C 2	35-60	B	F	10YR 5/3	10YR 3/3	PSAN,DD	<1	3, d	3, f, vs, int
C 3	60-110	F	F	10YR 5/4	10YR 3/4	PSAN,DD	<1	1, m	3, f, vs, int

^a(Seco) S-suelta; B-blanda; LD- ligeramente dura; D-dura; MD- muy dura; ED- extremadamente dura

(Húmedo) S-suelta; MF-muy friable; F- friable; FR-firme; MFR-muy firme; EFR-extremadamente firme

^b(Tipo) L-laminar; C-columnar; P-prismática; PAN-poliedrica angular; PSAN- poliedrica subangular; GR-granular; GMS-grumosa (Grado) SE- sin estructura; DD-débilmente desarrollada; MD-moderadamente desarrollada; FD-fuertemente desarrollada

^c1-muy raras; 2-raras; 3-pocas; 4-comunes; 5-abundantes; 6-extremadamente abundantes; f-finas; d-delgadas; m-medias; g-gruesas

^d1-muy pocos; 2-pocos; 3-frecuentes; 4-numerosos; mcp-microporos; mf-muy finos; f-finos; m-medianos; g-gruesos; vs-vesiculares; int-intersticiales; tb-tubulares.

Presenta una CIC alta, debido a los constituyentes del alófono, al pH y al contenido de materia orgánica en este horizonte, es alto en Ca²⁺ y Mg²⁺ y medio en K⁺, estando dominado el complejo de cambio por Ca²⁺, esto refleja la actividad microbiana en el horizonte superficial (Vela-Correa *et al.*, 2007), en comparación con el horizonte C1 y C2, ambos pobres en materia orgánica y carbono orgánico, sin embargo presenta una CIC alta y media. En ambos horizontes disminuye la disponibilidad de Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺ intercambiables ya que presentan un mayor lavado de bases. El fósforo disponible es bajo para todo el perfil (Tabla 4.6).

Tabla 4.5 Propiedades físicas de los perfiles de los subgrupos de UGM de laderas de montaña

Horizonte	^a Prof. cm	^b Hum. %	^c Da g/cm ³	^d Dr %	^e Por. %	Color				Partículas del Suelo			Clasificación textural
						Seco		Húmedo		arenas	arcillas	limos	
						Clave	Nombre	Clave	Nombre				
<i>Lmece (P1)</i>													
A	0-60	27.4	0.8	1.8	55.2	2,5Y 3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	10YR 2/1	Negro	55.6	36.0	8.4	Migajón arenosa
C 1	60-90	30.6	0.9	1.8	51.8	2,5Y 4/4	Pardo olivo	10YR 2/2	Pardo muy oscuro	81.0	13.5	5.5	Areno migajosa
C 2	90- 160	10.7	1.3	2.0	33.9	2,5Y 5/4	Pardo olivo claro	10YR 3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	87.0	11.1	1.9	Arenosa
<i>Lmsfl (P2)</i>													
A-11	0-10	54.2	0.5	1.2	61.4	10YR 3/1	Gris muy oscuro	10YR 2/1	Negro	66.8	28.8	4.4	Migajón arenosa
A-12	10-40	65.2	0.6	2.1	71.6	10YR 3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	10YR 2/1	Negro	55.2	39.6	5.2	Migajón arenosa
AC	40-80	79.1	0.6	2.0	70.4	10YR 4/2	Pardo amarillo oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro	81.2	11.6	7.2	Areno migajosa
C	80- 125	83.8	0.7	2.0	65.4	10YR 4/3	Pardo oscuro	10YR 3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	81.2	9.6	9.2	Arena migajosa
<i>Lmifl (P3)</i>													
A	0-10	70.0	0.6	2.2	71.9	10YR 4/2	Pardo amarillo oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro	60.0	35.2	4.8	Migajón arenosa
C	10-35	62.5	0.6	2.4	75.0	10YR 5/2	Pardo grisáceo	10YR3/3	Pardo oscuro	66.0	31.2	2.8	Migajón arenosa
C 2	35-60	76.9	0.6	2.5	77.9	10YR 5/3	Pardo	10YR 3/3	Pardo oscuro	76.0	21.2	2.8	Arena migajosa
C 3	60- 110	73.9	0.6	2.2	71.8	10YR 5/4	Pardo amarillento	10YR 3/4	Pardo negro	68.0	31.2	0.8	Migajón arenosa

^aProfundidad; ^bHumedad; ^cDensidad aparente; ^dDensidad real; ^ePorosidad

Tabla 4.6 Propiedades químicas de los perfiles de los subgrupos de UGM de laderas de montaña

Horizonte	Profundidad	pH 2:1 (H ₂ O) ^a	MO ^b	Corg. ^c	CIC ^d	Cationes Intercambiables				P ^h
						Ca ^{2+e}	Mg ^{2+f}	Na ⁺	K ^{+g}	
	cm		%			Cmol (+) kg-1				mg/ kg
<i>Lmece (P1)</i>										
A	0-60	5.50	8.6	5.0	29.0	11.7	4.6	0.3	0.3	1.6
C-1	60-90	5.70	4.5	2.6	22.6	7.8	3.9	0.1	0.1	0.0
C-2	90-160	5.80	1.0	0.6	15.4	6.3	2.0	0.0	0.0	0.0
<i>Lmsfl (P2)</i>										
A11	0-10	5.17	24.0	19.2	57.2	18.7	3.7	2.0	2.0	1.7
A12	10-40	5.65	16.7	9.7	57.2	20.9	6.6	1.5	1.5	0.6
AC	40-80	6.26	16.4	9.5	59.8	20.4	5.0	1.0	1.0	0.5
C	80-125	6.00	6.6	3.9	42.9	22.0	3.3	1.5	1.5	1.4
<i>Lmifl (P3)</i>										
A	0-10	6.46	9.5	5.5	38.0	17.6	4.4	1.6	1.6	1.5
C1	10-35	6.60	6.5	3.8	32.2	13.8	3.9	1.6	1.6	0.2
C2	35-60	6.55	6.3	3.7	35.7	13.8	5.0	1.6	1.6	0.5
C3	60-110	6.56	4.0	2.3	34.5	11.6	2.8	1.5	1.5	1.5

^apH 2: 1(H₂O): muy ácido (<5.5); ácido (5.6-6.0); ligeramente ácido (6.1-6.5); neutro (6.6-7.3); alcalino (7.4-8.3)

^bMateria orgánica: muy pobre (<2); pobre (2-5); medio (5-8); rico (8-15); muy rico (>15)

^cCarbono orgánico: muy pobre (<1.2); pobre (1.2-2.9); medio (2.9-4.6); rico (4.6-8.7); muy rico (>8.7)

^dCapacidad de intercambio catiónico: muy baja (<5.0); baja (5-15); media (15-20); alta (20-40); muy alta (>40)

^eCalcio²⁺: muy baja (<2); baja (2-5); media (5-10); alta (>10)

^fMagnesio²⁺: muy baja (<0.5); baja (0.5-1.3); media (1.3-3.0); alta (>3.0)

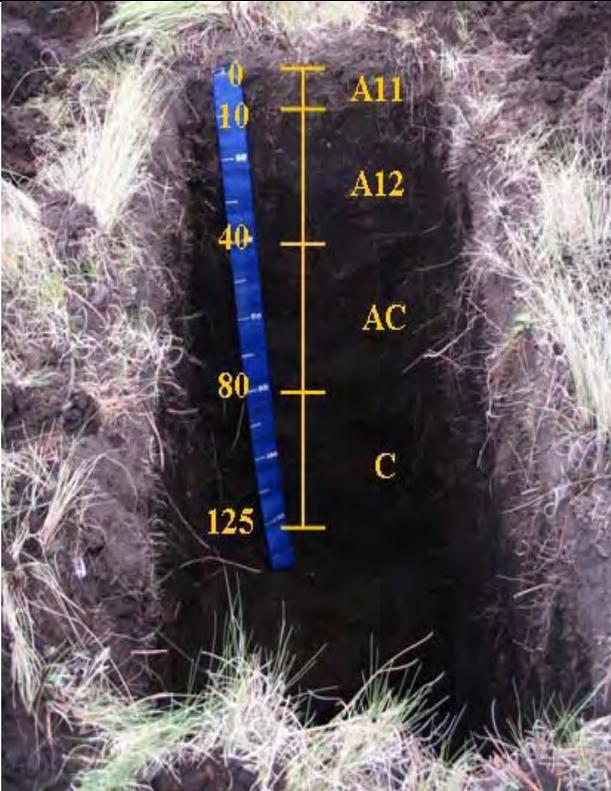
^gPotasio⁺: muy baja (<0.2); baja (0.2-0.3); media (0.3-0.6); alta (>0.6)

^hFósforo: pobre (<4.0); medio (4.0-6.9); rico (7.0-12.5); extremadamente rico (>12.5)

4.2.2 Perfil 2. Tlálloc

Se localiza en el subgrupo de *Lmsfl*, a una altitud de 3,520 m. El material parental del suelo está constituido por depósitos piroclásticos no consolidados de ceniza volcánica sobre andesita-basáltica. Particularmente el sitio presenta una inclinación de 2°, su morfografía longitudinalmente es plana y transversalmente cóncava. Se presentan procesos erosivos hídricos de flujo laminar. La vegetación está conformada por un bosque de *Pinus hartwegii* en asociación con pastizal de los géneros *Festuca* sp. y *Muhlenbergia* sp. En campo se clasificó como un Andosol (*World Reference Base*, FAO-ISRIC-ISSS, 1999) (Tablas 4.4 y 4.7).

Tabla 4.7 Morfología de los horizontes del perfil 2

	Descripción
	<p>A11 (0-10 cm). Su color es gris muy oscuro (10YR 3/1) en seco y negro (10YR 2/1) en húmedo, presenta una textura limo-arenosa, su consistencia es suelta en seco y muy friable en húmedo, el material es ligeramente adhesivo y plástico. Posee una estructura poliédrica subangular, débilmente desarrollada, con presencia de poros frecuentes (50 a 200 por dm^2) de tamaño muy fino (0.075 a 1 mm), dentro de los agregados de morfología vesicular. Sus raíces son comunes (10 a 100 por 3 dm^2) de diámetro fino ($<1 \text{ mm}$). Bien drenado.</p>
	<p>A12 (10-40 cm). Es de color pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) y negro (10YR 2/1) en húmedo, posee una textura limo arcillo-arenosa, de consistencia blanda en seco y muy friable en húmedo. El material del suelo es ligeramente adhesivo y plástico, su estructura es poliédrica subangular, débilmente desarrollada, la porosidad es muy poca (1 por dm^2), del tamaño de microporos ($<0.075 \text{ mm}$), presentes dentro de los agregados y vesiculares. La presencia de raíces es muy rara (<1 por 3 dm^2) de tamaño fino ($<1 \text{ mm}$ de diámetro). Es bien drenado.</p>
	<p>AC (40-80 cm). Es de color pardo amarillo oscuro (10YR 4/2) en seco y pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo y de textura limo arcillo-arenosa. Presenta una consistencia blanda en seco y muy friable en húmedo, el material es ligeramente adhesivo y plástico, su estructura es poliédrica subangular, débilmente desarrollada, sus microporos ($<0.075 \text{ mm}$ de diámetro) son numerosos (>200 por dm^2), dentro de los agregados y vesiculares; existen raíces raras (3 a 5 por 3 dm^2) de tamaño fino ($<1 \text{ mm}$). Bien drenado.</p>
	<p>C (80-125 cm). Su color es pardo oscuro (10YR 4/3) en seco y pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo, tiene una textura areno-migajosa y una consistencia blanda en seco y muy friable en húmedo, el material del suelo es ligeramente adhesivo y plástico. Posee una estructura poliédrica subangular y débilmente desarrollada, con poros numerosos (>200 por dm^2) del tamaño de microporos ($<0.075 \text{ mm}$), presentes dentro de los agregados y son vesiculares. Sus raíces son muy raras (3 a 5 por 3 dm^2) de tamaño fino ($<1 \text{ mm}$). Bien drenado.</p> <p>P2. Panorámica de una ladera de montaña superior de flujos lávicos</p>

Propiedades físicas y químicas del suelo (P2)

El contenido de humedad es >50% y se incrementa con la profundidad, debido a la cantidad de precipitación y a la pendiente (2°), la densidad aparente es baja, sin embargo, se incrementa con la profundidad, para el horizonte A es de 1.19 gr/cm³ y se incrementa hasta 2 g/cm³ en el horizonte C, debido a que la materia orgánica pesa mucho menos que un volumen igual de sólidos minerales, por lo que la cantidad de este constituyente en un suelo afecta marcadamente la densidad real (Buckman y Brady, 1977); ambas densidades definen el porcentaje de porosidad que es >61%. La textura que presentan los horizontes superficiales (A11 y A12), es migajón-arenosa mientras que los horizontes AC y C es arena-migajosa asociados a los valores de densidad aparente y real y por consiguiente al contenido de materia orgánica (Tabla 4.5).

Dentro de las propiedades químicas, el perfil presenta un pH ácido y particularmente este perfil presenta los valores más altos en contenidos de materia orgánica, por lo que se considera en general como rico en materia orgánica a excepción del horizonte C. Ambas propiedades dependen una de otra, la acidez es atribuible a la presencia de aluminio proveniente de la hidrólisis de compuestos alofánicos y a la vegetación de *Pinus* sp. La cantidad de sus acículas se vuelven potencialmente acidificantes, debido a la producción de ácidos orgánicos que influyen en la formación de complejos Al-humus, que al hidrolizarse incrementan la acidez del suelo (Shoji *et al.*, 1993). Presenta una elevada CIC atribuible al contenido de materia orgánica y a la textura (Peña, 1980). Los cationes intercambiables Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺, son altos en todo el perfil, dominando el complejo de cambio por Ca²⁺, es decir en este perfil se presenta un menor lavado de bases, lo que favorece la aceleración de los procesos microbianos en la descomposición de la materia orgánica (Vela-Correa *et al.*, 2007). El fósforo disponible es bajo en todo el perfil (Tabla 4.6).

4.2.3 Perfil 3. Volcán Xistune

Se localiza en el subgrupo de *Lmifl*, a una altitud de 3,160 m, constituido por depósitos piroclásticos no consolidados como ceniza volcánica sobre andesitas-basálticas.

Particularmente el sitio presenta una inclinación de 4°, con una orientación de S7°E, de morfografía transversalmente plana y longitudinalmente cóncava. Entre los flujos lávicos, que se encuentran en forma de bloques, el microrelieve está conformado de concavidades, donde se presentan procesos de acumulación y a nivel general se presentan procesos erosivos hídricos de flujo laminar. La vegetación está conformada por un bosque de *Pinus hartwegii* y *Pinus montezumae* en asociación con pastizal de los géneros *Festuca* sp. y *Muhlenbergia* sp. En campo este suelo se clasificó como un Andosol (*World Reference Base*, FAO-ISRIC-ISSS, 1999) (Tablas 4.5 y 4.8).

Propiedades físicas y químicas del suelo (P3)

El contenido de humedad es >70% asociado a la precipitación (1,200 mm de precipitación media anual), relación importante entre el desarrollo y la profundidad de los suelos (Osegueda, 1991). Presenta valores bajos de densidad aparente, debido a la presencia de materiales de origen orgánico (Vela-Correa *et al.*, 2007), mientras que la densidad real aumenta con la profundidad, a medida que se encuentran materiales menos intemperizados, como en el horizonte C2; la porosidad es >70% en todo el perfil y asociada al contenido de humedad, existe una alta permeabilidad (Osegueda, 1991). Los horizontes A, C1 y C3 poseen una textura migajón-arenosa, asociada a los materiales de origen orgánico, sin embargo el horizonte el C2 tiene una textura areno-migajosa (Tabla 4.6).

El perfil presenta un pH ligeramente ácido (6.1-6.5) a excepción del horizonte C1 que tiene un pH neutro. El contenido de materia orgánica y de carbono orgánico de acuerdo con Fassbender y Bortemiza (1994) es rico en el horizonte A, medio para los horizontes C1 y C2 y pobre para el C3. La CIC se considera alta para todo el perfil; es alto en Ca²⁺ y en Mg²⁺, el horizonte A es alto en K⁺ y medio en el resto del perfil, dominando el complejo de cambio por Ca²⁺. El fósforo aprovechable es bajo, debido a su retención por minerales alofánicos (Tabla 4.7)

Tabla 4.8 Morfología de los horizontes del perfil 3

	Descripción
	<p>A (0-10 cm). Presenta un color pardo amarillo oscuro (10YR 4/2) en seco y pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo, su textura es migajón-limosa, su consistencia es blanda en suelo seco y friable en húmedo, el material es ligeramente adhesivo y plástico. Posee una estructura poliédrica suangular, débilmente desarrollada, su porosidad es frecuente (50 a 200 por dm^2) de tamaño muy fino (0.075 a 1 mm) y finos (1 a 2 mm) dentro y fuera de los agregados, de morfología vesiculares. Presenta raíces comunes (10 a 100 por 3 dm^2) y delgadas (1 a 3 mm de diámetro).</p>
	<p>C 1 (10-35 cm). Su color es pardo grisáceo (10 YR 5/2) en seco y pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo, presenta una textura migajón arcillo-limosa, su consistencia es blanda en seco y friable en húmedo. Posee una estructura poliédrica subangular, débilmente desarrollada su porosidad es frecuente (50 a 200 por dm^2) de tamaño finos (1 a 2 mm), presentes dentro y fuera de los agregados, de morfología vesicular e intersticial. Con presencia de raíces comunes (10 a 100 por 3 dm^2) y delgadas (1 a 3 mm de diámetro). Bien drenado.</p>
	<p>C 2 (35-60 cm). Es de color pardo (10YR 5/3) y cambia a pardo oscuro (10YR 3/3), su textura es migajón arcillo-limoso, posee consistencia blanda en seco y friable en húmedo, su material es ligeramente adhesivo y plástico. Presenta una estructura poliédrica subangular, débilmente desarrollada con poros frecuentes (50 a 200 por dm^2) de tamaño fino (1 a 2 mm), presentes dentro y fuera de los agregados, de morfología vesicular e intersticial, presenta pocas raíces (5 a 10 por 3 dm^2) de diámetro delgado (1 a 3 mm). Bien drenado.</p>
	<p>P3. Volcán Xistune, se aprecia la concavidad, formada entre dos flujos lávicos; en dicha superficie se realizó la descripción morfológica del perfil, en la parte superior del flujo el suelo es un Leptosol como lo reportó INEGI (1984), sin embargo en dicha concavidad el suelo se clasificó como un Andosol.</p>

4.2.4. Perfil 4. Villa Milpa Alta.

Este perfil se localiza en el paraje Villa Milpa Alta, pertenece al subgrupo de *Pmcm*, a una altitud de 2,834 m. El material parental del suelo está constituido por depósitos piroclásticos no consolidados de ceniza volcánica sobre andesita-basáltica. El sitio presenta una inclinación de 10°, con una orientación al N28°W, con una morfografía transversalmente plana y longitudinalmente cóncava, donde a nivel general de piedemonte se presentan procesos de acumulación y localmente erosivos hídricos de flujo laminar y eólicos estacionales (enero-abril). Este sitio corresponde a un suelo dedicado al cultivo de nopal verdura. En campo se clasificó como un *Phaeozem* mólico, de acuerdo con la *World Reference Base* (FAO-ISRIC-ISSS, 1999) (Tablas 4.9 y 4.10).

Propiedades físicas y químicas del suelo (P4)

El contenido de humedad está en función del espesor de cada horizonte; así el horizonte A y el 2BC presentan altos contenidos de humedad, a diferencia de los horizontes intermedios, C y 2B, (ambos con un espesor de 5 cm) con contenidos de humedad de 43 y 33% respectivamente. Esta condición la comparten con las demás propiedades. La densidad aparente se incrementa con la profundidad, con excepción del horizonte 2BC, el cual tiene una D_a de 0.84 gr/cm³; la densidad real es comparativamente menor con respecto a la densidad promedio que presentan los minerales del suelo (2.6 g/cm³). La porosidad es >62% en el perfil con excepción del horizonte 2B. La textura es areno-migajosa en el horizonte A, arenosa en el C, migajón-arenosa en el 2B y migajón en el 2BC, en este perfil la textura se vuelve más fina conforme se incrementa la profundidad, debido a la presencia de un suelo sepultado (Tabla 4.11).

El perfil presenta un pH neutro (6.6-7.3), es decir igual concentración de iones H que de OH, especialmente porque la humedad del suelo se reduce en contenido, es decir que pendiente abajo los suelos se neutralizan debido a la concentración de sales, a causa de que la humedad del suelo se evapora con mayor facilidad (Buckman y Brady, 1977) (Tabla 4.12).

Tabla 4.9 Morfología de los horizontes del perfil 4

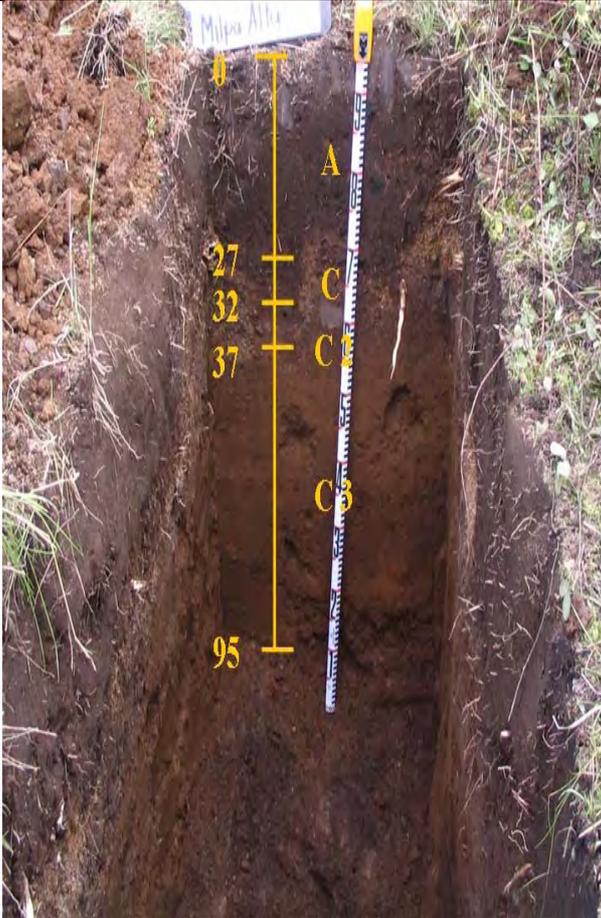
	Descripción
	<p>A (0-27 cm). Es de color pardo (10YR 5/3) en seco y es pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo, presenta una textura areno-limosa y una consistencia blanda en suelo seco y friable en húmedo, el material del suelo es ligeramente adhesivo y plástico. Su estructura es poliédrica subangular débilmente desarrollada, la porosidad es numerosa (>200 por dm²), de diámetro muy fino (1 a 2 mm) presentes, dentro de los agregados y de morfología intersticial. El contenido de raíces es abundante (100 a 500 por 3 dm²) de tamaño fino. Bien drenado.</p>
<p>C (27-32 cm). Es de color pardo pálido (10YR 4/3) en seco y cambia a pardo oscuro 10YR 4/3 en húmedo, tiene una textura arenosa y una consistencia blanda en seco y húmedo, el material no es adhesivo, ni plástico. No posee estructura y sus poros son numerosos (>200 por dm²) de diámetro muy fino (0.075 a 1 mm) y finos (1 a 2 mm) presentes fuera de los agregados e intersticiales, raíces comunes (10 a 100 por 3 dm²) y finas (<1 mm). Bien drenado.</p>	
<p>2 (B) (32-37 cm) Es de color gris claro (10YR 7/1) en seco y pardo amarillento oscuro (10YR 4/2) en húmedo, su textura es arcillo-limosa, presenta una consistencia blanda en seco y friable en húmedo, el material del suelo es ligeramente adhesivo y es plástico. Posee una estructura poliédrica subangular débilmente desarrollada, porosidad numerosa (>200 por dm²), del tamaño de microporos (<0.075 mm) y muy finos (0.075 a 1 mm), presentes dentro de los agregados, de morfología vesicular. Se presentan raíces raras (3 a 5 por 3 dm²) y finas (<1 mm). Bien drenado.</p>	
<p>2 (BC) (37-95 cm) Es de color pardo amarillento claro (10YR 6/4) en seco y gris oscuro (10YR 4/1) en húmedo, su textura es limo arcillo-arenosa, y su consistencia es blanda en suelo seco y friable en húmedo. El material es ligeramente adhesivo y plástico, con estructura poliédrica subangular débilmente desarrollada y porosidad numerosa (>200 por dm²), con presencia de microporos (<0.075 mm) y de diámetro muy fino (0.075 a 1 mm), dentro de los agregados, de morfología vesicular. Se presentan raíces muy raras (3 a 5 por 3 dm²) de diámetro fino (<1 mm). Bien drenado.</p>	
	<p>P4. Panorámica del paraje Villa Milpa Alta, correspondiente al subgrupo de piedemonte complejo medio.</p>

Tabla 4.10 Descripción morfológica de los perfiles de las UGM de piedemontes del volcán Tláloc

Hor.	Prof.	Consistencia ^a		Color		Estructura ^b	Pedregosidad (%)	Raíces ^c	Porosidad ^d
		Seco	Húmedo	Seco	Húmedo				
<i>Pmcmi (P4), Phaeozem mólico, pendiente 10°, 2,834 m</i>									
A	0-27	B	F	10YR/5/3	10YR/3/2	PSAN,DD	<1	5, f	4, mf,int
C	27-32	S	S	10YR 6/3	10YR 4/3	SE	50-70	4,f	4, mf, f,
2 B	32-37	B	F	10YR 7/1	10YR 4/2	PSAN,DD	<1	2,f	4, mc,mf,vs
2 BC	37-95	B	F	10YR 6/4	10YR 4/1	PSAN,DD	1-5	1,f	4, mc,mf,vs
<i>Pmcmi (P5) Phaeozem háplico, pendiente 11°, 2,762 m</i>									
A	0-40	B	MF	10YR 3/1	10YR 2/1	PSAN, DD	<1	1, f	4, f, vs
C 11	40-90	B	F	10YR 5/6	10YR 3/4	PSAN, DD	<1	0	4, f, vs
C 12	90-160	B	F	10YR 4/4	10YR 2/2	PSAN, DD	1-5	0	3, f, vs, int
C 2	>160	S	S	10YR 4/3	10YR 2/2	SE	5-20	0	4, m, int
<i>Pmci (P6) Regosol, pendiente 6°, 2,645 m</i>									
A 11	0-25	S	S	10YR 5/3	10YR 3/3	GR, DD	<1	5, f	4, mf,vs, int
A 12	25-55	S	S	10YR 5/3	10YR 3/3	GR, DD	1	4, f	3, mf, vs, int
C	55-80	S	S	10YR 5/3	10YR 3/3	GR, DD	50-70	3, f	2, mf, vs, int
C 2	80-130	B	MF	10YR 5/3	10YR 3/2	PSAN,DD	5-20	0	2, mf, vs, int
C 3	130-190	S	S	10YR 5/2	10YR 3/2	SE	0	0	1, mf, int
C 4	>190	S	S	10 YR 5/2	10YR 3/1	SE	0	0	1, mf, int

^a (Seco) S-suelta; B-blanda; LD- ligeramente dura; D-dura; MD- muy dura; ED- extremadamente dura

(Húmedo) S-suelta; MF-muy friable; F- friable; FR-firme; MFR-muy firme; EFR-extremadamente firme

^b (Tipo) L-laminar; C-columnar; P-prismática; PAN-poliedrica angular; PSAN- poliedrica subangular; GR-granular; GMS-grumosa (Grado) SE- sin estructura; DD-débilmente desarrollada; MD-moderadamente desarrollada; FD-fuertemente desarrollada

^c 1-muy raras; 2-raras; 3-pocas; 4-comunes; 5-abundantes; 6-extremadamente abundantes; f-finias; d-delgadas; m-medias; g-gruesas

^d 1-muy pocos; 2-pocos; 3-frecuentes; 4-numerosos; mcp-microporos; mf-muy finos; f-finios; m-medianos; g-gruesos; vs-vesiculares; int-intersticiales; tb-tubulares.

El contenido de materia orgánica y de carbono orgánico es muy pobre en los horizontes en todo el perfil, debido a que los horizontes superficiales están más expuestos a factores como la erosión al estar desprovistos de vegetación y a la disminución de la precipitación, mientras que en los subyacentes, a pesar de tener una textura de migajón, influye la profundidad por la presencia de materiales más compactos y menos intemperizados (Vela-Correa *et al.*, 2007). La CIC se considera alta en los horizontes 2B y 2BC debido a la textura, es alto en Ca²⁺ en el horizonte 2BC y medio en el horizonte A y 2B, mientras que es alto en Mg²⁺ en el horizonte A producto de la alteración provocada por los factores climáticos en los minerales ferromagnesianos y silicatos de magnesio, materiales comunes en los piroclastos que conforman estos suelos (Vela-Correa *et al.*, 2007). El P disponible es muy pobre en todo el perfil (Tabla 4.12).

Tabla 4.11 Propiedades físicas de los perfiles de los subgrupos de UGM piedemontes

Horizonte	^a Prof. cm	^b Hum. %	^c Da g/cm ³	^d Dr %	^e Por. %	Color				Partículas del Suelo			Clasificación textural
						Seco		Húmedo		arenas	arcillas	limos	
						Clave	Nombre	Clave	Nombre	%			
<i>Pmcmi (P4)</i>													
A	0-27	57.4	1.0	2.6	62.0	10YR/5/3	Pardo	10YR/3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	86.0	12.0	2.0	arena migajosa
C	27-32	42.7	0.9	2.4	62.5	10YR 6/3	Pardo pálido	10YR 4/3	Pardo oscuro	92.0	8.0	0.0	arena
2B	32-37	33.2	1.0	2.0	48.0	10YR 7/1	Gris claro	10YR 4/2	Pardo amarillento oscuro	52.0	43.0	4.4	migajón arenosa
2BC	37-95	64.1	0.8	2.6	67.2	10YR 6/4	Pardo amarillento claro	10YR 4/1	Gris oscuro	54.0	29.6	16.4	migajón
<i>Pmcmi (P5)</i>													
A	0-40	10.2	1.1	2.7	58.8	10YR 3/1	Gris muy oscuro	10YR 2/1	Negro	78.0	16.0	5.2	arena migajosa
C11	40-90	34.7	0.9	2.3	62.0	10YR 5/6	Pardo amarillento	10YR 3/4	Pardo amarillento oscuro	94.0	4.0	1.2	arena
C-12	90-160	26.4	0.9	2.6	64.4	10YR 4/4	Pardo amarillento oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro	92.0	4.0	3.2	arena
C 2	>160	11.6	1.0	2.7	64.7	10YR 4/3	Pardo oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro	98.0	0.0	1.2	arena
<i>Pmci (P6)</i>													
A11	0-25	20.5	0.9	2.5	65.2	10YR 5/3	Pardo	10YR 3/3	Pardo oscuro	84.0	12.0	4.0	arena migajosa
A12	25-55	20.5	1.0	2.5	60.8	10YR 5/3	Pardo	10YR 3/3	Pardo oscuro	82.0	12.0	6.0	arena migajosa
C	55-80	20.6	1.2	2.4	52.3	10YR 5/3	Pardo	10YR 3/3	Pardo oscuro	82.0	14.0	4.0	arena migajosa
C 2	80-130	15.1	1.2	2.6	55.0	10YR 5/3	Pardo	10YR 3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	88.0	8.0	4.0	arena
C 3	130-190	7.3	1.2	2.7	56.5	10YR 5/2	Pardo grisáceo	10YR 3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	90.0	8.0	2.0	arena
C 4	>190	5.8	1.1	2.6	58.6	10 YR 5/2	Pardo grisáceo	10YR 3/1	Gris muy oscuro	90.0	6.0	4.0	arena

^aProfundidad; ^bHumedad; ^cDensidad aparente; ^dDensidad real; ^ePorosidad

Tabla 4.12 Propiedades químicas de los perfiles de los subgrupos de UGM de piedemontes

Horizonte	Profundidad	pH 2:1 (H ₂ O) ^a	MO ^b	Corg. ^c	CIC ^d	Cationes Intercambiables				P ^h
						Ca ^{2+e}	Mg ^{2+f}	Na ⁺	K ^{+g}	
		cm	%		Cmol (+) kg-1				mg/ kg	
<i>Pmcmi (P4)</i>										
A	0-27	6.77	1.3	0.8	19.6	7.2	5.0	2.7	1.1	0.3
C	27-32	6.88	0.1	0.1	18.4	11.0	5.0	2.7	1.6	0.6
2B	32-37	6.81	0.0	0.0	23.0	7.7	1.7	1.8	1.0	0.0
2BC	37-95	6.85	0.3	0.2	47.2	25.3	11.6	4.2	3.2	0.0
<i>Pmcmi (P5)</i>										
A	0-40	6.16	0.2	0.1	13.0	7.7	2.8	1.9	0.7	2.7
C11	40-90	6.72	0.3	0.2	26.0	12.1	5.0	4.8	3.7	1.6
C12	90-160	6.54	0.3	0.2	19.5	12.1	2.8	2.0	1.2	1.1
C 2	>160	6.48	0.3	0.2	15.0	7.7	2.8	1.9	0.5	0.6
<i>Pmci (P6)</i>										
A11	0-25	6.62	1.2	0.7	13.1	14.9	3.9	2.5	1.1	1.2
A12	25-55	6.65	1.0	0.6	15.8	16.0	5.5	2.2	1.0	0.4
C	55-80	6.69	0.7	0.4	11.3	15.4	3.9	2.1	1.6	1.2
C 2	80-130	6.88	0.7	0.4	15.4	15.0	3.3	3.0	1.8	0.5
C 3	130-190	6.86	0.5	0.3	10.1	13.2	2.2	2.1	1.6	0.6
C 4	>190	6.95	0.4	0.2	11.6	13.8	3.3	3.2	1.6	0.3

^apH 2: 1(H₂O): muy ácido (<5.5); ácido (5.6-6.0); ligeramente ácido (6.1-6.5); neutro (6.6-7.3); alcalino (7.4-8.3)

^bMateria orgánica: muy pobre (<2); pobre (2-5); medio (5-8); rico (8-15); muy rico (>15)

^cCarbono orgánico: muy pobre (<1.2); pobre (1.2-2.9); medio (2.9-4.6); rico (4.6-8.7); muy rico (>8.7)

^dCapacidad de intercambio catiónico: muy baja (<5.0); baja (5-15); media (15-20); alta (20-40); muy alta (>40)

^eCalcio²⁺: muy baja (<2); baja (2-5); media (5-10); alta (>10)

^fMagnesio²⁺: muy baja (<0.5); baja (0.5-1.3); media (1.3-3.0); alta (>3.0)

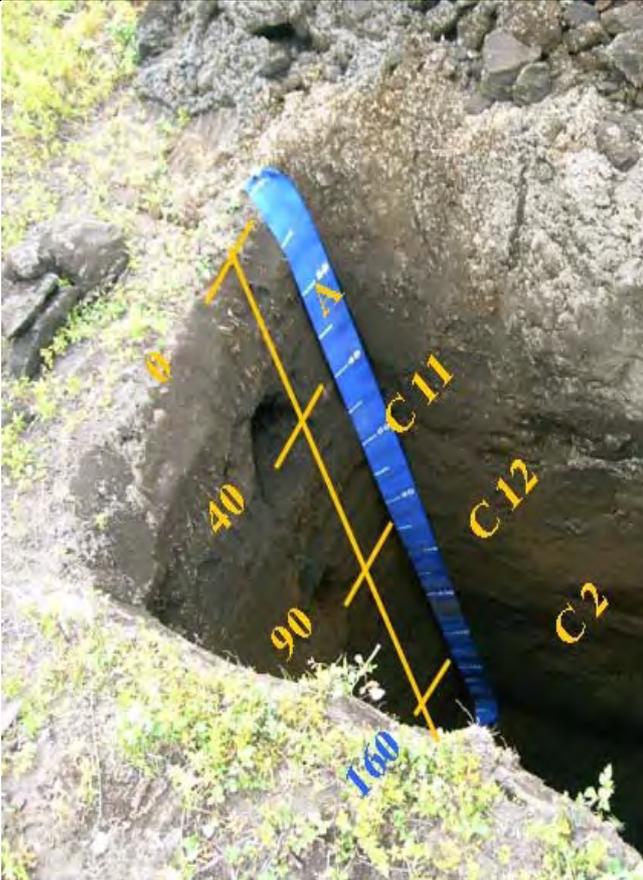
^gPotasio⁺: muy baja (<0.2); baja (0.2-0.3); media (0.3-0.6); alta (>0.6)

^hFósforo: pobre (<4.0); medio (4.0-6.9); rico (7.0-12.5); extremadamente rico (>12.5)

4.2.5 Perfil 5. Volcán San Miguel

Este sitio se localiza en un *Pmcm* a una altitud de 2,762 m. El material parental del suelo está constituido por depósitos piroclásticos no consolidados de ceniza volcánica sobre andesita-basáltica. El sitio presenta una pendiente de 11°, con una orientación N5°E, de morfografía longitudinalmente plana y transversalmente convexa. Se presentan procesos de acumulación a nivel general y localmente procesos erosivos hídricos de flujo laminar. Corresponde a un suelo dedicado a la agricultura con cultivo de maíz y en campo se clasificó a este suelo con base a la *World Reference Base* (FAO-ISRIC-ISSS, 1999) como un Phaeozem háptico (Tablas 4.10 y Tabla 4.13).

Tabla 4.13 Morfología de los horizontes del perfil 5

	Descripción
	<p>A (0-40 cm). Es de color gris muy oscuro (10YR 3/1) en seco y en húmedo es negro (10YR 2/1). Su textura es arenosa y la consistencia que presenta es blanda en seco y muy friable en húmedo, el material tiene adhesividad ligera y no es plástico. La estructura que posee es poliédrica subangular débilmente desarrollada, presencia de poros numerosos (>200 por dm²) de diámetro fino (1 a 2 mm), dentro y fuera de los agregados de morfología intersticial. Presenta raíces muy raras (<1 por 3 dm²) y de tamaño fino (<1 mm). Es un horizonte bien drenado.</p>
	<p>C 11 (40-90 cm). Es de color pardo amarillento (10YR 5/6) en seco y pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo, de textura arenomigajosa y consistencia blanda en seco y friable en húmedo, el material es ligeramente adhesivo y no plástico. Su estructura es poliédrica subangular, débilmente desarrollada con porosidad numerosa (>200 por dm²) de diámetro fino (0.075 a 1 mm), presente dentro y fuera de los agregados e intersticiales. Sin presencia de raíces. Es un horizonte bien drenado.</p>
	<p>C 12 (90-160 cm). Su color es pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) en seco y cambia a pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo. Su estructura es areno-migajosa y de consistencia blanda en seco y friable en húmedo, el material es ligeramente adhesivo y plástico. La estructura que predomina es poliédrica subangular débilmente desarrollada, con poros numerosos (>200 por dm²) de diámetro fino (0.075 a 1 mm) presentes dentro y fuera de los agregados, de morfología vesicular e intersticial. Sin presencia de raíces. Bien drenado.</p>
	<p>C 2 (>160 cm). Es de color pardo oscuro (10YR 3/3) en seco y es pardo muy oscuro (10YR 2/2) en suelo húmedo, posee una textura arenosa y una consistencia suelta en seco y en húmedo. El material del suelo es ligeramente adhesivo y no plástico, además no tiene estructura, sin embargo, posee poros numerosos (>200 por dm²) de diámetro mediano (2 a 5 mm), de morfología intersticial. Bien drenado.</p>
	<p>Panorámica del P5. Se presentan procesos geomorfológicos erosivos hídricos de flujo laminar, mientras que los límites litológicos predomina el flujo concentrado, donde se encuentran los árboles.</p>

Propiedades físicas y químicas del suelo (P5)

Los contenidos de humedad más bajos corresponden a los horizontes A y C2, y se incrementa en los horizontes C11 y C12. La densidad aparente es $>1 \text{ g/cm}^3$ en el horizonte A y desciende con la profundidad; mientras que la densidad real en este horizonte es de 2.67 gr/cm^3 , y desciende en el horizonte C11 y C12 y vuelve a ascender en el último horizonte. La textura es arena migajosa en A y es arenosa en los tres horizontes subyacentes (Tabla 4.11).

Presenta un pH ligeramente ácido (6.1-6.5), con excepción del horizonte C11 el cual es neutro. El contenido de materia orgánica y de carbono orgánico es muy pobre para todo el perfil. La CIC se considera alta en el horizonte C11, media para el horizonte C12 y C2 y baja para el horizonte superficial. Es alto en Ca^{2+} en los horizontes C11 y C12, mientras es medio en A y C2; es alto en Mg^{2+} en el horizonte C11 y medio en los horizontes A, C12 y C2 y es alto en K^+ en todo el perfil con excepción del C2, donde es medio. El P disponible es pobre en todo el perfil (Tabla 4.12)

4.2.6 Perfil 6. Santa Ana Tlacotenco

Se localiza en el área del pueblo de Santa Ana Tlacotenco, a una altitud de 2,645 m. Este sitio pertenece al piedemonte complejo medio-inferior (*Pmcmi*), donde el material parental del suelo está constituido por depósitos piroclásticos no consolidados de ceniza volcánica sobre andesitas. Presenta una inclinación de 6° , con una orientación de $\text{N}45^\circ\text{W}$; su morfografía longitudinalmente es plana y transversalmente convexa. Se presentan procesos erosivos hídricos de flujo laminar. Este perfil corresponde a una parcela sin cultivar por varios años, debido a la presencia de residuos de cultivos como maíz y nopal alrededor del mismo y una vegetación de hierbas y magueyes. En campo se clasificó a este suelo con base a la *World Reference Base* (FAO-ISRIC-ISSS, 1999) como un Regosol (Tablas 4.10 y 4.14).

Tabla 4.14 Morfología de los horizontes del suelo del perfil 6

	Descripción
	<p>A 11 (0-25 cm). Es de color pardo (10YR 5/3) en seco y pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo. Presenta una textura areno-arcillosa, una consistencia suelta en suelo seco y friable en húmedo, su adhesividad es ligera y es plástico. Posee una estructura granular débilmente desarrollada, los poros son numerosos (>200 por dm²) de diámetro muy fino (0.075 a 1 mm), y están presentes dentro y fuera de los agregados. Las raíces son abundantes (100 a 500 por dm²) y de tamaño fino (<1 mm por 3 dm²). Bien drenado.</p>
	<p>A 12 (25-55 cm). Presenta un color pardo (10YR 5/3) en seco y pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo, su textura es areno-arcillosa y la consistencia es suelta y friable en húmedo. Posee adhesividad ligera y es plástico, su estructura es granular, débilmente desarrollada, presenta porosidad frecuente (50 a 200 por dm²) de diámetro muy fino (0.075 a 1 mm), dentro y fuera de los agregados, de morfología vesicular e intersticial. Las raíces son comunes (10 a 100 por 3 dm²) de tamaño fino (<1 mm por 3 dm²). Bien drenado.</p>
	<p>C (55-80 cm). Es de color pardo (10YR 5/3) en seco y pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo. La textura es areno-migajosa y la consistencia es blanda en suelo seco y muy friable en húmedo, no presenta adhesividad y su plasticidad es ligera. Por otra parte, su estructura es poliédrica subangular y se encuentra débilmente desarrollada, presenta pocos poros (1 a 50 por dm²) de diámetro muy fino (0.075 a 1 mm), dentro y fuera de los agregados, de morfología vesicular e intersticial. Está bien drenado.</p>
	<p>C 2 (80-130 cm). Es de color pardo (10YR 5/3) en seco y pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo. La textura es areno-migajosa y la consistencia es blanda en suelo seco y muy friable en húmedo, no es adhesivo y su plasticidad es ligera. Por otra parte, su estructura es poliédrica subangular y se encuentra débilmente desarrollada, presenta pocos poros (1 a 50 por dm²) de diámetro muy fino (0.075 a 1 mm), dentro y fuera de los agregados, de morfología vesicular e intersticial.</p>
	<p>C 3 (130-190 cm). Es de color pardo grisáceo (10YR 5/3) en seco y pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo, posee una textura arenosa, su consistencia es suelta en seco y húmedo. El material no es adhesivo, ni plástico, presenta pocos poros (1 a 50 por dm²) de diámetro muy fino (0.075 a 1 mm), de morfología intersticial. Sin raíces. Bien drenado.</p>
	<p>C 4 (>190 cm). Tiene un color pardo grisáceo (10YR 5/2) en seco y gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo con una textura arenosa y una consistencia suelta en suelo seco y en húmedo, el material es no adhesivo y no plástico. No presenta estructura y sus poros son muy pocos (1 a 50 por dm²) de diámetro muy fino (0.075 a 1 mm), dentro de los agregados e intersticial. No hay evidencia de raíces</p>

P6. Paraje Santa Ana Tlacotenco, donde se observa la agricultura de temporal con cultivo de nopal verdura

Propiedades físicas y químicas del suelo (P6)

El perfil tiene una profundidad de 200 cm, en donde se observa que el contenido de humedad disminuye con la profundidad y la densidad aparente es $<1 \text{ gr/cm}^3$, debido a que mediante la agricultura los materiales están más compactados, mientras que en el resto del perfil es menor a la unidad; la densidad real del perfil es comparativamente mayor que los valores de los perfiles de las laderas de montaña, sobre todo en los horizontes C2, C3 y C4, donde la densidad de las partículas sólidas es mayor (Buckman y Brady, 1977); influyendo directamente en la porosidad del suelo, ya que el mayor porcentaje de ésta se localiza en los horizontes superiores y disminuye con la profundidad por la presencia de materiales más compactos y menos intemperizados (Vela-Correa *et al.*, 2007) y finalmente la textura es arena migajosa en los horizontes superficiales y arenosa en los subyacentes (Tabla 4.11).

El perfil presenta un pH neutro (6.6-7.3) similar al perfil 4, debido a que el contenido de humedad disminuye y la materia orgánica es pobre. La CIC se considera media para el horizonte A12 y C2 debido a la textura y baja en el resto del perfil; es alto en Ca^{2+} y Mg^{2+} con excepción del horizonte C3, el cual es medio y alto en K, dominando el complejo de cambio por Ca^{2+} ; el fósforo es pobre en todos los horizontes (Tabla 4.12).

4.2.7 Perfil 7. Milpa Alta

Este sitio se localiza en el poblado de Milpa Alta, a una altitud de 2,372 m, en una planicie aluvial (*Pal*), donde el material parental del suelo está constituido por depósitos no consolidados de ceniza volcánica sobre andesitas. Presenta una inclinación de 1° , con una orientación S 75° E, siendo en sentido longitudinal y transversal un sitio plano. Se presentan procesos geomorfológicos erosivos hídricos de flujo laminar. El uso de suelo es de agricultura de temporal no cultivado desde hace diez años (comunicación personal con el dueño de la parcela). En campo se clasificó a este suelo con base a la *World Reference Base* (FAO-ISRIC-ISSS, 1999) como un Regosol ócrico, debido al color que presentaron los horizontes (Tablas 4.15 y 4.16).

Tabla 4.15 Morfología de los horizontes del perfil 7

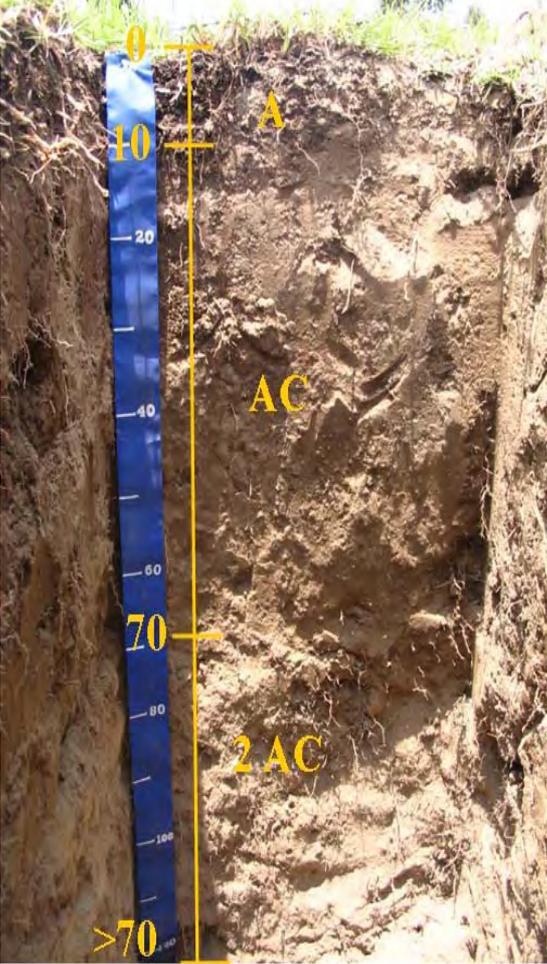
	Descripción
	<p>A (0-10 cm). Es de color pardo (10YR 3/3) en seco y pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo, su textura es migajosa, posee una consistencia blanda en seco y friable en húmedo, el material es ligeramente adhesivo y plástico. Su estructura es granular (está dada por las raíces) y es débilmente desarrollada, presenta poros frecuentes (50 a 200 por dm^2) de tamaño muy fino (0.075 a 1 mm), finos (1 a 2 mm) y medianos (2 a 5 mm), dentro y fuera de los agregados. La presencia de raíces es abundante (100 a 500 por 3 dm^2), su tamaño varía de finas (<1 mm) a gruesas (10 a 30 mm). Está bien drenado.</p> <p>AC1 (10-70 cm). Es de color pardo (10YR 5/3) en seco y pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo. Su textura es areno-limosa y la consistencia que presenta es blanda en seco y friable en húmedo. El material tiene una adhesividad ligera y es plástico, presenta una estructura poliédrica subangular, débilmente desarrollada. La presencia de poros es poca (1 a 50 por dm^2) de tamaño fino (1 a 2 mm) dentro y fuera de los agregados, de morfología vesicular e intersticial. Hay raíces comunes (10 a 100 por 3 dm^2) de finas a medias (<1 mm a 10 mm). Bien drenado.</p> <p>AC2 (>70 cm). Es de color pardo pálido (10YR 4/2) en seco y pardo amarillento oscuro (10YR 4/2) en húmedo. Su textura es areno-limosa, con una consistencia blanda en seco y friable en húmedo, el material no es adhesivo y es ligeramente plástico. Tiene una estructura poliédrica subangular que se encuentra débilmente desarrollada. La porosidad es frecuente (50 a 200 por dm^2) de diámetro fino y mediano (1 a 2 mm y 2 a 5 mm respectivamente), su morfología es vesicular e intersticial. La presencia de raíces es común (10 a 100 por 3 dm^2) del tamaño de finas a medias (<1 mm a 10 mm). Bien drenado.</p>
	<p>Panorámica del P7. Planicie aluvial de Milpa Alta, al fondo el piedemonte complejo.</p>

Tabla 4.16 Descripción morfológica del perfil de la UGM de la planicie de la ladera norte del volcán Tláloc

Hor.	Prof.	Consistencia ^a		Color		Estructura ^b	Pedregosidad (%)	Raíces ^c	Porosidad ^d
		Seco	Húmedo	Seco	Húmedo				
<i>Pal (P7), Regosol, pendiente 1°, 2,372 m</i>									
A	0-10	B	MF	10YR 5/3	10YR 3/3	GR, DD	<1	5,f,d,m,g	3,mf,f,m
AC	10-70	B	MF	10YR 5/3	10YR 3/3	PSAN, DD	1	4, f, d, m	2, mf
2AC	>70	B	MF	10YR 6/3	10YR 4/2	PSAN, DD	1-20	4, f, d, m	3, f,m

^a(Seco) S-suelta; B-blanda; LD- ligeramente dura; D-dura; MD- muy dura; ED- extremadamente dura

(Húmedo) S-suelta; MF-muy friable; F- friable; FR-firme; MFR-muy firme; EFR-extremadamente firme

^b(Tipo) L-laminar; C-columnar; P-prismática; PAN-poliedrica angular; PSAN- poliedrica subangular; GR-granular; GMS-grumosa

(Grado) SE- sin estructura; DD-débilmente desarrollada; MD-moderadamente desarrollada; FD-fuertemente desarrollada

^c1-muy raras; 2-raras; 3-pocas; 4-comunes; 5-abundantes; 6-extremadamente abundantes; f-finias; d-delgadas; m-medias; g-gruesas

^d1-muy pocos; 2-pocos; 3-frecuentes; 4-numerosos; mcp-microporos; mf-muy finos; f-finios; m-medianos; g-gruesos; vs-vesiculares; int-intersticiales; tb-tubulares.

Propiedades físicas y químicas del suelo (P7)

El contenido de humedad en el horizonte A es de 31%, en el AC de 13% y en el 2AC de 8%, considerándose como un perfil con bajo contenido de humedad; la densidad aparente es baja para el horizonte A, especialmente por el contenido de materiales orgánicos y supera a la unidad conforme se incrementa la profundidad. La porosidad es >60% y el espacio poroso varía con la profundidad del suelo (<70 cm para este perfil), por lo que existe una adecuada aireación (Buckman y Brady, 1977), con una textura de arena migajosa en los tres horizontes, principalmente porque sus características morfológicas muestran una consistencia suelta y friable, buena aireación y drenaje (Tabla 4.16), además de ser fácilmente cultivables (Buckman y Brady, 1977) (Tabla 4.17).

Presenta un pH neutro (6.6-7.3) en el horizonte A y AC, sin embargo, el horizonte 2AC es alcalino (7.4-8.3). El contenido de materia orgánica y de carbono orgánico es medio en el horizonte A y bajo para los horizontes AC y 2AC. La CIC se considera baja para todo el perfil principalmente por la relación que presenta con la textura y la materia orgánica, debido a que las arenas son pobres en arcilla coloidal y deficientes en humus, de ahí que sus capacidades de adsorción catiónica sean menores (Buckman y Brady, 1977). Es alto en Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺,

dominando el complejo de cambio por Ca²⁺; el P disponible es alto en el horizonte A (9.65 meq/100g) y pobre en el resto del perfil (Tabla 4.18).

Tabla 4.17 Propiedades físicas del perfil del subgrupo de UGM de planicie aluvial general

Hor.	^a Prof.	^b Húm.	^c Da	^d Dr	^e Por.	Color				Partículas del Suelo			Clasificación textural
						Seco		Húmedo		arenas	arcillas	limos	
						Clave	Nombre	Clave	Nombre				
<i>Pal (P7)</i>													
A	0-10	30.9	0.7	2.5	73.2	10YR 5/3	Pardo	10YR 3/3	Pardo oscuro	84.0	14.0	2.0	arena migajosa
AC	10-70	12.8	1.0	2.6	60.0	10YR 5/3	Pardo	10YR 3/3	Pardo oscuro	80.0	12.0	8.0	arena migajosa
2AC	>70	8.7	1.0	2.7	63.7	10YR 6/3	Pardo pálido	10YR 4/2	Pardo amarillento oscuro	84.0	12.0	4.0	arena migajosa

^aProfundidad; ^bHumedad; ^cDensidad aparente; ^dDensidad real; ^ePorosidad

Tabla 4.18 Propiedades químicas de los sitios del subgrupo de UGM de la planicie aluvial general

Horizonte	Prof.	pH 2:1 (H ₂ O) ^a	MO ^b	Corg. ^c	CIC ^d	Cationes Intercambiables				P ^h
						Ca ^{2+e}	Mg ^{2+f}	Na ⁺	K ^{+g}	
	cm		%			Cmol (+) kg-1				mg/ kg
<i>Pal (P7)</i>										
A	0-10	6.91	5.4	3.1	12.0	17.1	8.3	3.0	2.6	9.7
AC	10-70	6.74	0.8	0.5	12.0	14.9	4.4	3.5	1.8	1.8
2AC	>70	7.78	0.5	0.3	12.8	18.7	3.9	2.5	0.7	0.9

^a pH 2: 1(H₂O): muy ácido (<5.5); ácido (5.6-6.0); ligeramente ácido (6.1-6.5); neutro (6.6-7.3); alcalino (7.4-8.3)

^bMateria orgánica: muy pobre (<2); pobre (2-5); medio (5-8); rico (8-15); muy rico (>15)

^cCarbono orgánico: muy pobre (<1.2); pobre (1.2-2.9); medio (2.9-4.6); rico (4.6-8.7); muy rico (>8.7)

^dCapacidad de intercambio catiónico: muy baja (<5.0); baja (5-15); media (15-20); alta (20-40); muy alta (>40)

^eCalcio²⁺: muy baja (<2); baja (2-5); media (5-10); alta (>10)

^fMagnesio²⁺: muy baja (<0.5); baja (0.5-1.3); media (1.3-3.0); alta (>3.0)

^gPotasio⁺: muy baja (<0.2); baja (0.2-0.3); media (0.3-0.6); alta (>0.6)

^hFósforo: pobre (<4.0); medio (4.0-6.9); rico (7.0-12.5); extremadamente rico (>12.5)

4.3 Análisis estadístico de las UGM con respecto a los sitios de muestreo de suelos

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico aplicado a las unidades geomorfológico-morfogenéticas y las propiedades físicas y químicas del suelo. Los resultados del análisis de componentes principales (ACP) de los datos del horizonte A de siete de los trece subgrupos de UGM, muestran que hay dos eigenvalores que explican el 80% del total de la varianza (Tabla 4.19) y al analizar la gráfica de eigenvalores (Figura 4.4), se observa que ambos eigenvalores generan cierta inclinación a la curva y se rompe dicha inclinación a partir del eigenvalor número 3, donde la curva tiene un comportamiento asintótico. El primer factor de la nueva matriz generada a partir del ACP, explica >50% de la varianza total, por lo que contiene la mayor cantidad de variables explicadas. El segundo factor explica >30% de la varianza total.

Se obtuvieron seis factores, en los cuales cada factor representa un conjunto de variables. Hay dos factores los cuales son los más importantes porque ellos explican la correlación estadística de las variables (Tabla 4.19). El primero fue nombrado altitudinal porque este tiene el nivel más alto de coordenadas (>0.9), es decir, la mayor cantidad de variables están relacionadas con la altitud. El segundo factor fue nombrado porosidad con un factor de coordenadas (>0.9). El tercer factor fue nombrado fósforo (>0.6).

Tabla 4.19 Número de factores para explicar la varianza de los datos

Componente o factor	Eigenvalores de la correlación matriz			
	Eigenvalor	% Varianza	Eigenvalor acumulado	% Acumulado
1	10.169	50.846	10.169	50.846
2	6.148	30.741	16.317	81.587
3	1.784	8.919	18.101	90.506

Gráfica de eigenvalores

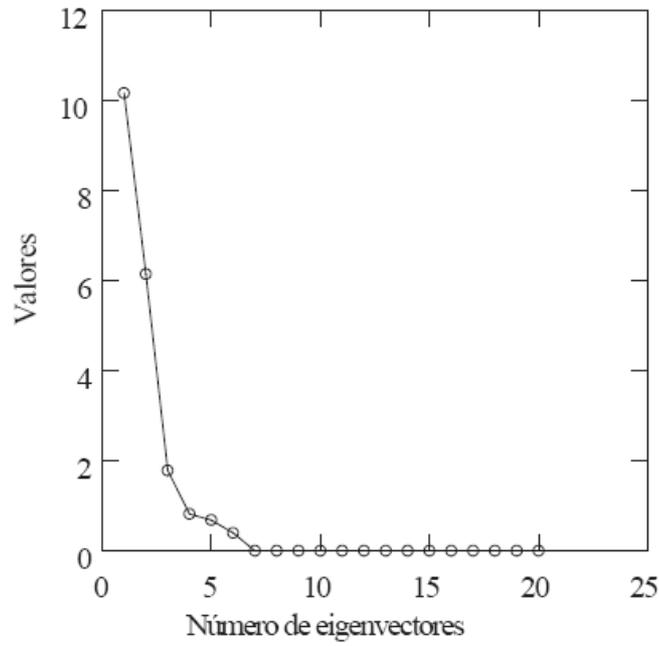


Figura 4.4 Gráfica de eigenvalores. El eigenvalor 1 y 2 son los más importantes, aunque también 3 y 4, sin embargo, como lo muestra la Tabla 4.19, los que representan mayor cantidad de variables son los primeros dos componentes.

En la Tabla 4.20, se muestra que el factor altitudinal es inversamente proporcional a la cantidad de arenas, es decir en los subgrupos de laderas de montaña la clasificación textural es migajón-arenosa, debido a que la temperatura y la precipitación varían con la altitud, por lo que el desarrollo de la vegetación potencialmente genera un contenido de materiales orgánicos mayor, favoreciendo la textura, a diferencia de los subgrupos de piedemonte y planicies, donde los procesos de acumulación son principalmente de materiales poco intemperizados como las arenas. Por otra parte, la densidad real es inversamente proporcional a la altitud, principalmente porque los materiales amorfos que predominan en las laderas de montaña propician que la densidad real sea menor en comparación con los subgrupos de piedemontes y

planicies, donde el contenido de materia orgánica es pobre y por consiguiente predominan partículas de mayor densidad.

Tabla 4.20 Matriz de factores, producto del análisis de componentes principales aplicado a la matriz de sitios. Presenta seis factores donde sobresalen las cargas estadísticas de cada variable >0.7

Variable	Factores descargados					
	Extracción: Componentes Principales					
	Altitudinal	Porosidad	Fósforo	Factor 4	Factor 5	Factor 6
Pendiente	0.370	-0.769	0.279	0.373	0.220	0.077
Altitud	0.976	-0.133	-0.065	0.092	0.129	0.003
Profundidad	0.432	-0.714	0.334	-0.342	0.116	0.250
Humedad	0.377	0.607	-0.606	0.277	0.162	0.136
Da	-0.520	-0.823	-0.191	-0.054	0.050	-0.102
Dr	-0.924	-0.221	-0.249	0.079	-0.154	-0.080
Porosidad	-0.234	0.927	-0.068	0.102	-0.265	0.027
Arenas	-0.946	-0.038	-0.082	-0.230	0.206	0.042
Limos	0.936	0.157	0.035	0.258	-0.171	-0.050
Arcillas	0.710	-0.554	0.310	0.024	-0.290	0.090
pH	-0.901	0.209	-0.170	0.214	-0.095	0.245
MO	0.803	0.555	0.045	-0.162	0.102	-0.096
Corg.	0.780	0.542	0.017	-0.253	0.131	-0.130
CIC	0.860	0.410	-0.255	-0.146	0.056	-0.056
Ca ²⁺	0.355	0.782	0.227	-0.233	-0.316	0.241
Mg ²⁺	-0.299	0.722	0.481	0.133	0.325	0.890
Na ⁺	-0.825	0.445	-0.202	-0.237	0.155	-0.006
K ⁺	-0.731	0.550	0.364	0.107	0.137	0.030
PSB	-0.935	-0.201	0.175	-0.134	-0.193	-0.013
P	-0.438	0.507	0.658	0.153	-0.008	-0.309
Var. Expl.	10.169	6.148	1.784	0.819	0.683	0.397

El pH representa una variable más que se relaciona inversamente proporcional a la altitud, es decir a mayor elevación la reacción del suelo disminuye, debido principalmente a que la humedad y la vegetación influyen en la acidez del suelo, provocado por la hidrólisis de los compuestos alofánicos y la cantidad de acículas de *Pinus* sp. Por otra parte las variables que se relacionan directamente con la altitud, son principalmente la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, ambas propiedades químicas se incrementan con la elevación, pero también con la disminución del pH y con la textura. Como ya se mencionó la textura de migajón, presente en los subgrupos de laderas de montaña aumenta la capacidad de cambio a

diferencia de la textura arenosa que predomina en los subgrupos de piedemontes y planicies, deficientes en arcilla coloidal y en humus, ya que los suelos son pobres en materia orgánica.

Es importante mencionar que el porcentaje de limos es directamente proporcional a la altitud, ya que los porcentajes de arenas son menores en los subgrupos de laderas de montaña, existen otros materiales del tamaño de los limos que cumplen con la función de proporcionar materia orgánica y nutrientes al suelo y por lo tanto a la vegetación, completando así el sistema abierto del suelo.

Otra variable que representa una relación inversa con respecto a la altitud es el Na^+ y el K^+ intercambiables, debido a que a diferencia del Ca^{2+} y el Mg^{2+} , el Na^+ y el K^+ existen en menor proporción tanto en los subgrupos de laderas de montaña como en el piedemonte y la planicie. Una parte de calcio y casi todo el potasio existen como componentes de los minerales complejos del suelo. Estas formas desaparecen lentamente a través de los años por la acción disolvente del agua cargada con ácido carbónico y otros ácidos. El potasio liberado en una reacción de este tipo puede ser tomado por las plantas, perdido por drenaje o detenido por los coloides del suelo, a diferencia de que una gran cantidad de Ca^{2+} , se vuelve móvil por este tipo de reacción. El remplazamiento, o cambio iónico, se produce con facilidad y rapidez, por lo que se dice que domina el complejo de cambio por el calcio (Buckman y Brady, 1977).

El factor porosidad es inversamente proporcional a la densidad aparente, es decir que el suelo tiene una mayor aireación si existe una densidad aparente baja. En los subgrupos de laderas de montaña dominan porcentajes de porosidad $>70\%$ y densidades bajas y en los subgrupos de piedemontes y planicies existen valores $>50\%$ y densidades relativamente más altas. Esta relación está en función de la textura, ya que donde predomina la textura de migajón, el contenido de materia orgánica es mayor y donde predominan las texturas arenosas y la materia orgánica pobre, los suelos muestran un 35 a 50% de espacio poroso (Buckman y Brady, 1977)

Las Figuras 4.5 y 4.6, ilustran la relación entre las variables del factor altitudinal (1) y porosidad (2); en el primer cuadrante se distribuyen las laderas de montaña de flujos lávicos y las variables que se localizan son la humedad, los limos, la MO, el CO y la CIC; en el segundo

cuadrante, se encuentra la planicie aluvial donde las propiedades representadas son, la porosidad, el fósforo, el Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y el pH; en el tercer cuadrante se distribuyen los subgrupos de piedemontes, donde las variables de suelos más representativas son las arenas, la densidad aparente y real, aunque cabe destacar que las arenas forman parte del segundo cuadrante, por último en el cuarto cuadrante se distribuye el subgrupo de *Lmece*, donde la pendiente, la profundidad y las arcillas son las variables que representan a este subgrupo. La variable altitud se encuentra cercana al primer cuadrante y opuesta a la variable arenas, como se comprueba gráficamente la correlación negativa que existe entre ellas. De igual manera se observa el comportamiento entre la porosidad con respecto a la pendiente y a la profundidad.

Factores gráficos: Factor 1 y Factor 2

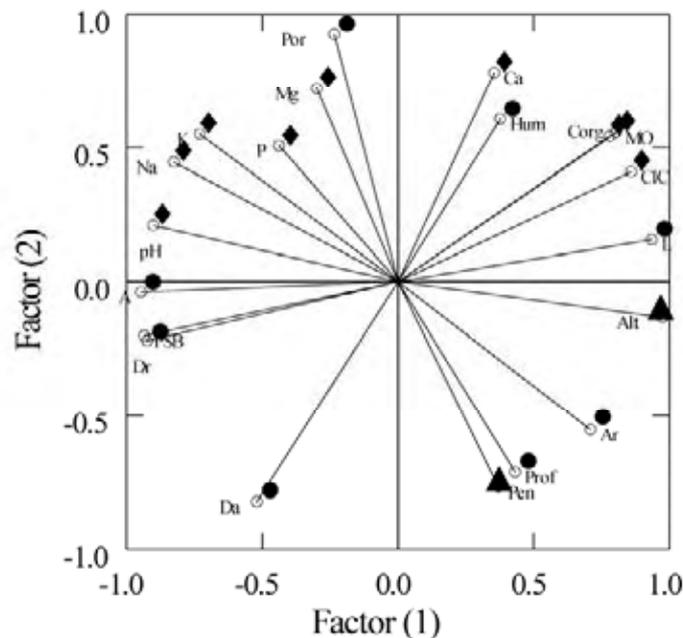


Figura 4.5. Gráfica de factores, el factor altitudinal y el factor porosidad. Las características del relieve fueron designadas por un símbolo representativo (▲), de igual manera las propiedades físicas (●) y las propiedades químicas (◆).

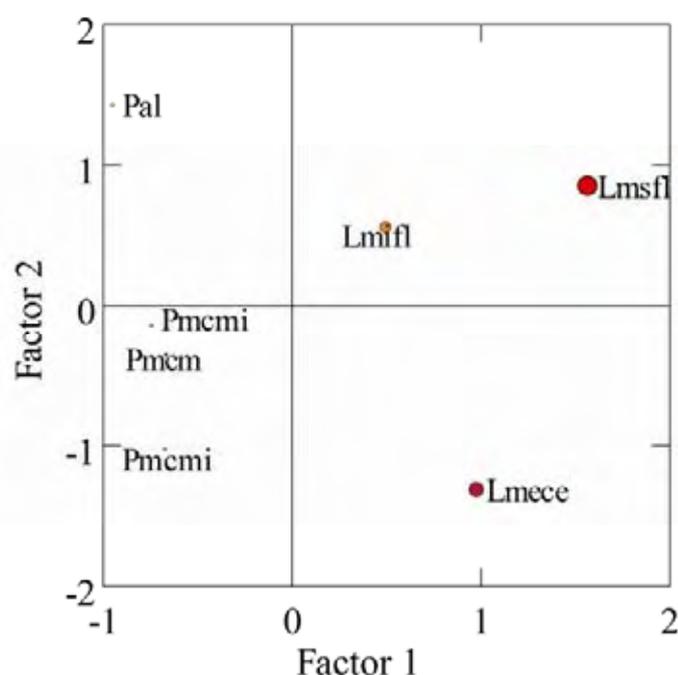


Figura 4.6. Gráfica de factores altitudinal (1) y porosidad (2), de acuerdo con los sitios de muestreo de suelos, donde se ilustra la distribución de los subgrupos analizados.

Obtenidos los factores principales se escogieron las variables de mayor importancia y que controlan a la población. Para esto se tomó como criterio que los eigenvalores fueran de la mayor carga estadística para cada factor, lo que indicaría una alta correlación entre las variables, y así los agrupamientos presentarían una buena definición. Por esta razón se eligieron todas las variables con cargas estadísticas cercanas y mayores a 0.9. Se destacaron las variables de altitud (0.98) y limos (0.94), además del segundo factor se eligieron la porosidad (0.94), el Ca^{2+} (0.79) y el Mg^{2+} (0.72). Se generó la matriz de distancias euclidianas para siete casos, con lo cual se creó el dendrograma de vecinos lejanos para toda la población (Figura 4.7), donde se muestran dos grupos bien diferenciados, lo cual nos conduce a concluir que el agrupamiento de subgrupos de unidades guarda una fuerte relación estadística.

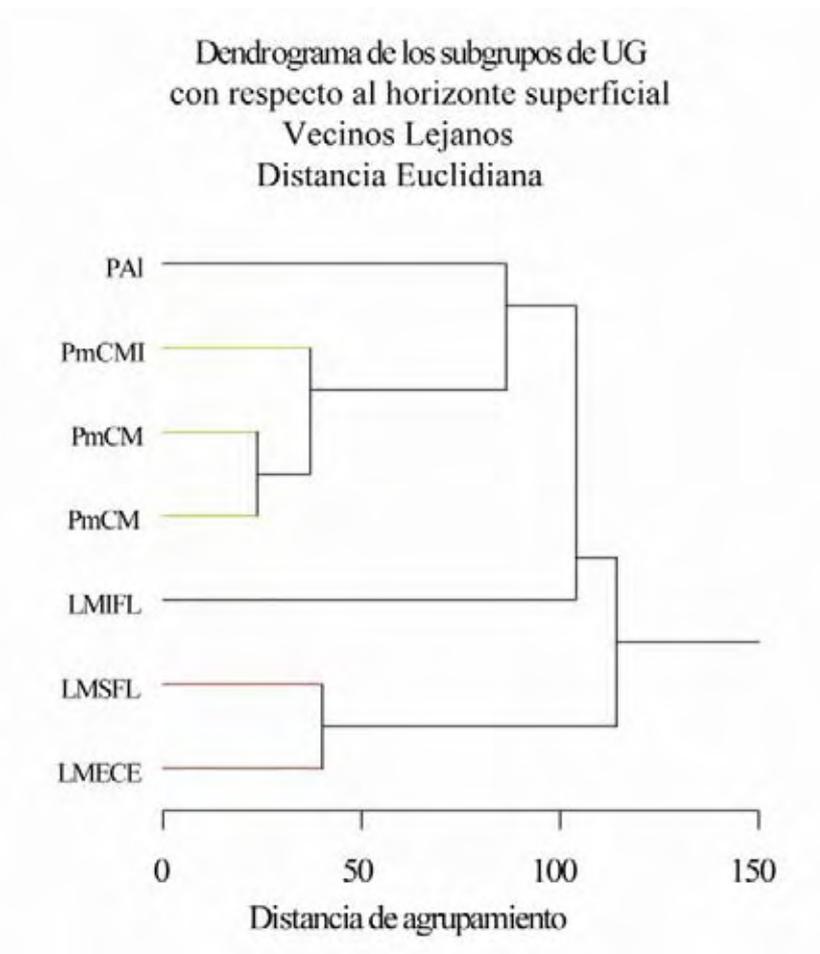


Figura 4.7 Dendrograma para todos los sitios de estudio de la ladera norte del Volcán Tláloc, por medio de la distancia euclidiana se observa la lejana separación entre la planicie aluvial y los subgrupos de laderas de montaña, quedando como intermedios los subgrupos del piedemonte complejo.

Capítulo 5. Discusión

De la descripción morfológica de perfiles, hay un aspecto que resaltar con respecto a los horizontes del suelo de origen volcánico. La evolución de los suelos es A/C, indica un estado tardío de desarrollo de suelos (Moustakas *et al.*, 2005). En campo, resulta fácil identificar el horizonte A en comparación de lo difícil que resulta diferenciar un horizonte C de otro, atribuido principalmente a las características del color. El material del suelo en todos los perfiles es de friable a muy friable y no adhesivo. El matiz (tinte) es 10YR, es decir en los horizontes predominan los colores pardos en suelo húmedo y éstos se caracterizan por una intensidad (*value*) de 3 o menor. Los suelos se identificaron por una textura arenosa, con una estructura débilmente desarrollada y un buen drenaje.

El contenido de materia orgánica está influyendo en el color de los horizontes del perfil, es decir a mayor contenido de MO, el color tiende a ser más oscuro, independientemente de la composición mineralógica del material parental (Moustakas *et al.*, 2005). El efecto se observó en el horizonte superficial, aunque se presentaron diferencias entre los horizontes asociados a la presencia de raíces y rocas, sin embargo los perfiles son homogéneos.

Los suelos en los subgrupos de laderas de montaña presentan una profundidad promedio de 130 cm; la humedad en los horizontes superficiales es mayor en comparación con los subsuperficiales con excepción del P2, en este perfil la humedad se incrementa con la profundidad. En el P3, la humedad es >60%, mientras que en el P1 la humedad desciende con la profundidad debido a que la pendiente es de 28°. La pendiente en P2 y P3 es de 2 y 4° respectivamente, esto indica que en las laderas más dinámicas, la capacidad de retención de agua es menor que en las zonas estables (Morgan, 1979). Estos suelos están caracterizados por su alto contenido de humedad, asociada a valores bajos de densidad aparente (Oseguera, 1991). En el P1, la densidad aparente se incrementa con la profundidad y el P2 presentó menor densidad (0.5 gr/cm³) que el P3 (0.6 gr/cm³). La baja densidad aparente, principalmente refleja su alta porosidad (Valera, 1993) ya que la porosidad del tercer perfil fue mayor (>70%) que en el segundo y el primero (ambos entre 50%), donde se garantiza la aireación, la permeabilidad

y retención de agua. La textura en los subgrupos de laderas de montaña fue migajón arenosa y areno-migajosa en los horizontes subyacentes.

El contenido de materia orgánica (MO) fue de muy rico a rico en los horizontes superficiales y de medio a pobre en los subsuperficiales, es decir en los tres perfiles del grupo de laderas, la MO desciende con la profundidad. Asociados estos a un pH muy ácido, ácido y ligeramente ácido (de <5.5 a 6.55), donde los valores para los cuales está considerada la naturaleza ácida del material parental y la ausencia de carbonatos. Esto es explicado por Shoji *et al.* (1993) quienes señalan que los niveles de pH son influenciados por la presencia de aluminio (activo) proveniente de la hidrólisis de compuestos alofánicos y la cantidad de materia orgánica que son potencialmente acidificantes por la producción de ácidos orgánicos, es decir, a mayor cantidad de materia orgánica en la solución del suelo, mayor será la acidez.

Los valores de capacidad de intercambio catiónico también son altos (entre 20 y 40 y >40 Cmol +/kg⁻¹) y reflejan la relación entre los contenidos de MO, el contenido de arcillas o la textura y en particular con los iones en solución (Birkeland, 1999). La CIC es alta y se atribuye a la cantidad y tipo de arcillas alofánicas. El porcentaje de saturación de bases constituye el porcentaje total de cationes intercambiables, de este modo hay una cercana relación entre el PSB y el pH. Las bases intercambiables están presentes en el orden de abundancia de Ca²⁺>Mg²⁺>Na⁺>K⁺. La saturación de bases está dominada por iones de Ca²⁺ y Mg²⁺ atribuibles a la alteración de los feldespatos cálcicos y olivinos presentes en el material parental (Vela-Correa y Flores-Román, 2004) y el fósforo aprovechable es bajo, debido a su retención por alófono (Shoji *et al.*, 1993).

La profundidad del suelo en los perfiles del subgrupo de *Pmcm* (P4 y P5) fue ≤100 cm y en el P6 del subgrupo de *Pmcmi* fue >160 cm, donde el desarrollo de horizontes también fue mayor. Existe una relación entre la profundidad y el contenido de humedad en los perfiles del piedemonte; así el P4, es el perfil menos profundo de los tres y contiene al menos 50% de humedad en sus dos horizontes de menor espesor (5 cm cada uno); el P5 contiene al menos 30% de humedad y su profundidad es menor comparativamente con el P6 y este perfil contiene al menos 20% de humedad. Por otra parte, la profundidad se relaciona con las arenas,

textura predominante en el piedemonte; el perfil menos profundo (P4) tiene una textura areno-migajosa, los perfiles más profundos (P5 y el P6) presentan una textura areno-migajosa en sus horizontes superficiales y conforme se incrementa la profundidad los horizontes son arenosos, lo que indica su baja tasa de intemperismo (Moustakas *et al.*, 2005), es decir, que a pesar de que los suelos son más profundos, no significa que sean más estables y los suelos menos profundos no se encuentran bajo el proceso de erosión, caso contrario a lo que encontraron Galicia *et al.*, (1995).

Por otra parte, está clara la relación que existe entre el contenido de humedad y la textura, ya que las arenas tiene una mayor porosidad, por lo que retienen con menor energía el agua. En este caso, la densidad menor a la unidad se presentó en los horizontes superficiales de los tres perfiles, donde la relación de la textura con la densidad aparente está claramente identificada en el P6, donde los horizontes arenosos presentan los valores más altos de densidad aparente. Existe una disminución del porcentaje de porosidad en los tres perfiles, con respecto a los elevados porcentajes que presentan los subgrupos de laderas, sin embargo son >50%. Un factor que influye directamente tanto en el desarrollo del suelo como en los contenidos de humedad es el clima local, registrado en la descripción de las UGM, lo que repercute en sus propiedades químicas.

El contenido de materia orgánica (MO) fue muy pobre (<2%), para los tres perfiles de los subgrupos de piedemonte; estos valores bajos en combinación con el bajo contenido de arcilla explican la carencia de estructura de suelo (Moustakas *et al.*, 2005). Finalmente, los altos contenidos de arenas en el suelo impiden el desarrollo de la estructura, importante para el movimiento del agua a través del suelo y la superficie de erosión (Birkeland, 1999).

Los valores de capacidad de intercambio catiónico (CIC) son bajos y medios en un intervalo de 10 a 19 C mol⁽⁺⁾ kg⁻¹ y reflejan la condición física de las arenas. Ya que, las superficies cargadas negativamente son atraídas por los cationes, en los subgrupos de piedemontes el contenido de arenas es mayor, por lo que esta propiedad física de los suelos indica que las partículas de arena son inertes (sin carga) y no tienen reacción, por lo que la capacidad de intercambio es de baja a muy baja. Por otra parte, las bases intercambiables están presentes en

el orden de abundancia de $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$. El PSB, está relacionado con el pH y el fósforo es pobre en la mayoría de los horizontes.

El P7 del subgrupo de *Pal* es el menos profundo con respecto a los seis anteriores, el contenido de humedad descende con la profundidad y la densidad aparente es baja; la densidad real en este perfil está de acuerdo con el promedio (2.6 gr/cm^3) de los minerales dominantes en el suelo. Este perfil junto con el de las laderas inferiores de flujos lávicos (P3), presentan una porosidad $>70\%$ en el horizonte superficial. La textura en los tres horizontes es arena migajosa, similar a la clasificación textural que se presentó en el piedemonte, por lo que la estructura del suelo es débil. A pesar de ser una planicie, el contenido de materia orgánica es de media a muy pobre y se encuentra relacionado a la baja CIC, a diferencia de los cationes intercambiables Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , que son altos.

Gerrard (1992) menciona que la profundidad del suelo es la respuesta a la dinámica geomorfológica y pedológica del perfil, así, la profundidad del suelo en los sitios de los subgrupos *Lmece*, *Lmsfl*, *Lmifl*, y *Pmcmi* fue $>100 \text{ cm}$; en uno de los sitios del subgrupo de *Pmcm* (P4) fue igual a 95 cm y la profundidad menor fue para el P7 (70 cm) del subgrupo de *Pal*. En sitios donde existe una situación estable, es decir, donde no existe transporte ni depositación, la profundidad del suelo es mayor. Por el contrario, en una zona con una marcada dinámica de los procesos de erosión y de transporte se genera un déficit en la profundidad del suelo (Trudgill, 1983). Lo que explica la dinámica del P7 de la *Pal*, el cual resulta ser inestable en comparación con los sitios de las demás posiciones de la ladera.

Los mayores porcentajes de humedad se presentan en los sitios de los perfiles P2 y P3, que corresponde a los subgrupos de *Lmsfl* y *Lmifl*, las cuales se encuentran a altitudes mayores a $3,000 \text{ m}$, donde la temperatura y la precipitación influyen directamente en los porcentajes (Rodríguez-Gamiño y López-Blanco, 2005). Los valores medios se localizan en los P4 y P5, que corresponden al subgrupo de *Pmcm*; este porcentaje se debe a que estos sitios se encuentran a una altitud promedio de $2,700 \text{ m}$. Los porcentajes bajos de humedad se localizan en los sitios 6 y 7 que corresponden a los subgrupos de *Pmcmi* y *Pal*, respectivamente, a una altitud promedio de $2,300 \text{ m}$, donde la precipitación disminuye. La precipitación se encuentra

íntimamente ligada con la humedad del suelo; a mayor humedad mayor intemperismo (Valera, 1993)

La densidad aparente en el subgrupo de *Lmsfl* (P2) presentó los valores más bajos (0.5 gr/cm^3) de todos los sitios de estudio, como respuesta a que el alófono imparte a los suelos que lo contienen una baja densidad aparente (Peña, 1980). Con respecto al P3 del subgrupo de *Lmifl*, la D_a es baja en todo el perfil (0.6 gr/cm^3), y en el P1 del subgrupo de *Lmece*, se presentó una $D_a > 0.8 \text{ gr/cm}^3$, lo que indica que la inclinación en este sitio es un factor que influye en la intemperización de los materiales de textura arenosa y a mayor profundidad, los materiales son más resistentes, a diferencia de los sitios de piedemonte donde los valores son $> 1 \text{ gr/cm}^3$.

Los perfiles presentan valores de densidad real bajos, sobre todo en los sitios localizados en las laderas de montaña, los cuales corresponden dentro del intervalo de 2.0 a 0.7 gr/cm^3 , para los horizontes A (Birkeland, 1999). Sin embargo, en los horizontes AC y C la densidad real es baja, debido a la velocidad con que se intemperiza la ceniza volcánica, provocando un descenso en la misma.

Los perfiles 1, 2 y 3 de los subgrupos de *Lmece*, *Lmsfl* y *Lmifl*, presentan una textura migajón arenosa en los horizontes superficiales y arena migajosa conforme se incrementa la profundidad, hasta llegar a ser arenoso el horizonte C del P1. Por otra parte en los perfiles del 4 al 7 de los subgrupos de unidades de piedemonte y planicie predominan las arenas; la textura es areno-migajosa en el horizonte superficial y arenosa en los subsuperficiales. En las condiciones de temperatura y precipitación locales de estos tipos de relieve, el proceso de desgaste no es facilitado. De modo que el factor principal en la restricción del desarrollo del suelo es el clima (Moustakas *et al.*, 2005). Además existe una relación directa entre el contenido de arenas y el contenido de humedad que se presenta en los sitios de las posiciones de piedemonte y planicie (P4, P5, P6 y P7), donde se presentan contenidos medios y bajos de humedad, así como una textura dominante arenosa y esto es debido a las condiciones climáticas y también a que las arenas tienen un mayor tamaño de poros, por lo que retienen con menor energía el agua (Galicia *et al.*, 1995).

El pH de ligeramente ácido a ácido se presenta en los perfiles 1, 2 y 3 de los subgrupos de *Lmece*, *Lmsfl* y *Lmifli* respectivamente, donde el contenido de materia orgánica es alto y existe una cobertura vegetal de *Pinus* sp. Por otra parte, los suelos con un pH neutro se presentan en los perfiles 4, 5, 6 y 7, de los grupos de piedemonte y planicie, en donde además se practica la agricultura de nopal, verdura y maíz. El pH en el suelo determina la disponibilidad de nutrimentos y está generalmente en función del contenido de materia orgánica.

El alto contenido de materia orgánica se presentó en los horizontes superficiales de los perfiles de los subgrupos de *Lmece* (P1), *Lmsfl* (P2) y *Lmifl* (P3). Peña (1980) menciona que dentro de las propiedades químicas que da el alófono a los suelos que lo contienen, resultan en una mayor retención de materia orgánica. Debido a la cantidad de humedad del suelo y de la cobertura vegetal sobre los subgrupos unidades de laderas de montaña (Rodríguez-Gamiño y López-Blanco 2005). A diferencia de los perfiles de los subgrupos de *Pmcm* (P4) y (P5), *Pmcmi* (P6) y *Pal* (P7) donde el contenido de materia orgánica es pobre, las condiciones de humedad disminuyen, predominan las arenas y la profundidad del suelo es menor. Los suelos de los perfiles mencionados anteriormente se encuentran en un proceso erosivo, debido a que la cobertura vegetal natural es sustituida por cultivos, por lo que los suelos tienden a ser más arenosos y el tamaño de sus poros mayor, permitiendo un déficit en el contenido de materia orgánica (Buckman y Brady, 1977). Birkeland (1999), menciona que la materia orgánica es la propiedad que busca una estabilidad en el suelo más rápidamente que otra propiedad del suelo, por lo que la dinámica de las unidades de piedemonte y planicie desfavorece la agregación de materia orgánica y nutrientes, sin embargo, en las unidades de ladera, las características del suelo no se alteran (Morgan, 1979).

En los perfiles 2 y 3 del subgrupo de *Lmsfl* y *Lmifl*, la CIC es alta, donde los suelos son de textura migajón-arenosa, la cantidad de materia orgánica es alta y la acidez del suelo va de ligera a muy ácida. La CIC depende del tamaño de las partículas, de la cantidad de materia orgánica y de la acidez y alcalinidad del suelo. En los perfiles de los subgrupos de *Pmcm* (P4) y (P5), *Pmcmi* (P6) y *Pal* (P7), los suelos son arenosos; esta propiedad física de los suelos, indica que las partículas de arena son inertes (sin carga) y no tienen reacción, por lo que la capacidad de intercambio es baja.

Los suelos pueden acumular iones solubles de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , de la superficie cumbral y depositarlos en la posición de piedeladera donde el lavado es débil y el enriquecimiento es fuerte (Tsui *et al.*, 2004). Birkeland (1999), menciona que la tasa de lavado dependerá del clima local. Sin embargo como ya se mencionó bajo las condiciones climáticas del Tlálloc, el proceso de intemperismo desfavorece los procesos de lavado, por lo que la distribución de Ca^{2+} aparece como una de las concentraciones altas, junto con el Mg^{2+} , a lo largo de la ladera, donde el intervalo de estos valores se encuentra entre 11 y 22 Cmol (+) kg^{-1} para el Ca^{2+} y de 3 a 11 Cmol (+) kg^{-1} para el Mg^{2+} . Cabe destacar que el sitio 1 del subgrupo de *Lmece*, se encuentra en una inclinación de 28° , influyendo en su dinámica de intemperismo y lavado, sin embargo, los materiales alofánicos, influyen en su capacidad de retención de iones solubles. El sitio 2 del subgrupo de *Lmsfl* es considerado como una posición cóncava dentro de los subgrupos de unidades, tal posición reduce el movimiento del agua del suelo acumulándose cationes solubles que provienen de las posiciones superiores.

La disponibilidad de fósforo es pobre en la mayoría de los sitios y la adsorción de ácido sulfúrico y ácido húmico reduce la capacidad de adsorción del suelo para los fosfatos. Se cree también que esta reducción en la fijación de fósforo puede deberse a la formación de complejos insolubles con el aluminio activo del suelo (Peña, 1980).

Conclusiones

Los subgrupos de UGM de laderas de montaña de cono de escoria y de flujos lávicos (*Lmce* y *Lmfl*) son más recientes (Holoceno) a diferencia de los subgrupos de piedemonte complejo y planicie aluvial (*Pmc* y *Pal*), ambos del Pleistoceno. Los procesos geomorfológicos que predominan en la ladera norte del volcán son los erosivos de flujo hídrico laminar y con respecto a su forma los subgrupos de *Lmce* y *Lmfl*, se caracterizaron por ser de forma convexa en sentido longitudinal y transversal; los subgrupos de *Pmc*, longitudinalmente de forma plana y transversalmente convexa y en los subgrupos de *Pal* su forma dominante es plana, en ambos sentidos. Con respecto a sus características biofísicas, los subgrupos de origen reciente tienen un clima frío, la vegetación y el uso de suelo es forestal con especies de *Pinus hartwegii* principalmente, a diferencia de los subgrupos de edad pleistocénica, donde predominan un clima más seco y el uso de suelo es agrícola con cultivos de nopal, verdura y maíz.

Los suelos de la ladera norte del Volcán Tláloc, por sus características físicas y químicas de los sitios estudiados, se formaron a partir del intemperismo de materiales piroclásticos no consolidados, como ceniza volcánica, que yacen sobre rocas ígneas intermedias como andesitas-basálticas o sobre rocas ígneas piroclásticas consolidadas como tobas, por lo que presentan una secuencia de evolución A/C. Lo que significa que las propiedades de los suelos varían no solo con respecto a su posición en la ladera sino también con respecto a su origen.

Las propiedades físico-químicas del suelo de los subgrupos de *Lmce* y *Lmfl* presentaron altos contenidos de materia orgánica, asimismo de capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables, atribuible al alto contenido de humedad, a los valores bajos de pH y a los materiales amorfos (en particular el alófono) que imparten estas propiedades al suelo. Sin embargo en los subgrupos de *Pmc* y *Pal*, predominó la textura arenosa, donde el contenido de materia orgánica es pobre y la capacidad de intercambio catiónico es baja, atribuible a los bajos contenidos de humedad y a la actividad agrícola. El fósforo aprovechable es bajo en todos los subgrupos de UGM debido a su retención por minerales alofánicos.

El análisis estadístico muestra la separación entre los subgrupos de UGM, señalando la distribución de las propiedades físicas y químicas a lo largo de la ladera, las cuales se encuentran en función de la altitud, la pendiente, la orientación y la forma de la ladera.

Existen relaciones funcionales biunívocas entre las formas del relieve y el tipo de materiales, la intensidad de los procesos geomorfológicos y la profundidad del suelo, las características morfométricas y la distribución de las propiedades físicas y químicas, entre otras. Sin embargo, la temperatura, la precipitación, la vegetación y el uso de suelo, consideradas para este trabajo, forman parte de su funcionalidad. De esta manera el elevado contenido de MO de los subgrupos de *Lmce* y *Lmfl*, es producto de la descomposición de restos orgánicos, principalmente de la vegetación arbórea y por consiguiente de las condiciones ambientales que generan este tipo de bosques, ya que contribuyen al desarrollo de organismos que degradan y mineralizan la MO, aportando una gran cantidad de humus al suelo.

Las relaciones funcionales relieve-suelo encontradas en este trabajo, proporcionan información para futuros estudios y en la elaboración de programas de manejo forestal, desarrollo rural, manejo de recursos naturales, para la conservación del suelo en áreas agrícolas, las cuales requieren de este tipo de asociaciones, porque se explican las características del relieve y del suelo y por tanto de su dinámica.

Bibliografía

- Anhert, F., (1998), Introduction to geomorphology, Ed. London: Arnold, p.352.
- Aracil, J. (1983), Introducción a la dinámica de sistemas, Ed. Alianza, Universidad Textos, Madrid, 254 p.
- Arana, S. L., (2004), Geología de los volcanes monogenéticos, Teutli, Tlaloc, Tlacotenco, Ocusacayo y Cuauhtzin en la Sierra Chichinautzin, al sur de la Ciudad de México, Tesis de Maestría, Instituto de Geología, UNAM, México 117 p.
- Arnold, R.W., (1983), *Concepts of soils and pedology*. In: Wilding, L.P., Smeck, N.E. and Hall, G.F., Editors, 1983. *Pedogenesis and Soil Taxonomy: I. Concepts and Interactions*, Elsevier, Amsterdam, pp. 1–21.
- Ávila, V., (1998), Cartografía geológica y estratigrafía del Grupo Chichinautzin, en el área de Tepoztlán, Morelos, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 59 p.
- Bertalanffy, L., (1976), Teoría general de sistemas, Ed. FCE, México, 80 p
- Birkerland, W. P., (1999), Soils geomorphology, 3ª ed., Ed. Oxford University Press, Inc., 430 p.
- Birkeland, P. W., R. R. Shroba, S. F. Burns, A. B. Price, P. J. Tonkin, (2003), *Integrating soils and geomorphology in mountains-an example from the front range of Colorado*, *Geomorphology* 55, pp. 329-344.
- Buol, S. W., F. D. Hole. Y R. J McCracken, (1989), Génesis y clasificación de suelos. Ed. Trillas, México, D. F., 417 p.
- Buckman, H. O y N. C. Brady, (1974), Naturaleza y propiedades de los suelos, Ed. Harla, 590 p.
- Butler, B. E., (1982), *A new system for soil studies*, *European Journal of Soil Science* 33(4):581-595

- CHCVM, (Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México), (1964), Hidrología de la Cuenca del Valle de México, Tomo I. Secretaría de Recursos Hidráulicos, México, D. F. 2-85, 2-86, 2-87, 2-97 y 2-115.
- Conacher, A. J. and Dalrymple, J. B., (1977), *The nine unit landsurface model: an approach to pedogeomorphic research*. *Geoderma* 18: 1–153.
- Coque, (1984), Geomorfología, Ed. Alianza, Madrid España, 475p.
- Dallas, E. J., (1998), Métodos multivariados aplicados al análisis de datos, México, International Thomson, Edts (ITP), 566 p.
- Daniels, R. B., Gamble, E. E. and Cady, J. G., (1970), *Some relationships among Coastal Plain soils and geomorphic surfaces in North Carolina*, Soil Sci. Soc. Am. Proc.34: 648-653.
- Daniels, R.B. and Hammer, R.D., (1992), Soil Geomorphology, Ed. Wiley, NY, 236 p.
- Dan, J., Yaalon, D.H., (1964), *The application of the catena concept in studies of pedogenesis in Mediterranean and desert fringe areas*. Trans. 8th Intl Congr. Soil. Sci. 83: 751-758
- Dijkerman, J. C., (1974), *Pedology as a science: The role of data, models and theories in the study of natural soil systems*, *Geoderma*, 11(2):73-93
- De Pedraza, G. J., (1996), Geomorfología, principios, métodos y aplicaciones, Ed. Alarcón, Madrid: Rueda, 414 p.
- FAO-ISRIC-ISSS (Food and Agriculture Organization), (1999), Base referencial mundial del recurso suelo (*World Reference Base*). Informes sobre recursos mundiales de suelos 84. Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo (SICS), Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos (ISRIC) y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma Italia, pp. 9-13
- Fassbender, H. W. y Bornemisza, E. (1994), Química de Suelos con Énfasis en Suelos de América Latina. Ed. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica, 420 p.
- Fisher, R.V. y Schminke H.U., (1984), Pyroclastic Rocks, Ed. Springer-Verlag, Berlín, 472 p.
- Galicia, L., F García. O. y J. López-Blanco., (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*, núm. especial 3 pp. 53-75.
- Galicia, L., J. López-Blanco, A. E. Zarco-Arista, V. Filips, F. García-Oliva, (1999), *The relationship between solar radiation interception and soil wáter content in a tropical deciduous forest in Mexico*, *Catena* 36: 153-164.
- Gamble, E. E., Daniels, R. B. and Nettleton, W. D., (1970), *Geomorphic surfaces and soils in the Black Creeck, Creek Valley, Johnston Country, North Carolina*, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34:276-281
- García, E. (1998), *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*, 5ª ed. Ed. Instituto de Geografía, UNAM, México p.
- Gerrard, J. (1992), *Soils geomorphology: and integration of pedology and geomorphology*, Ed. Chapman & Hall, London, pp. 1-68.
- González, H. I. S. (1992), *La variación secular en México central durante los últimos 30,000 anos por medio del estudio magnético de lavas*, Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, UNAM 147 p.
- González, E. H., (1998), *Estudio geomorfológico de la porción oriental de la Sierra Chichinautzin, Cuenca de México*, Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, 85 p.
- Hall, G. F., (1983), *Pedology and geomorphology*, In: Wilding, L.P., Smeck, N.E., Hall, G.F. (Eds.), *Pedogenesis and Soil Taxonomy: I. Concepts and Interactions*. Elsevier, Amsterdam, pp. 117– 140.
- Hiroishi, M. S. (1974), *Estudio de algunos perfiles de suelos derivados de cenizas volcánicas de los volcanes Xitle, Teutli, Chichinautzin y el Cerro Tres Cumbres*, Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 42 p.
- Hugget, R. J., (1975), *Soil landscape systems: A model of soil genesis*, *Geoderma*, 13: 1-22
- Hugget, R. J., (2003), *Fundamentals of geomorphology*. Ed. New York, Routledge, 385 p.

- INEGI, (1970), Fotografías aéreas de Milpa Alta, escala 1:20,000, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI, (1984a), Carta Topográfica de Milpa Alta (E14-A49) a escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI (1984b), Carta Geológica de Milpa Alta (E14-A49) a escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México
- INEGI (1984c), Carta Edafología de Milpa Alta (E14-A49) a escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI (1984d), Carta de Uso de Suelo y Vegetación de Milpa Alta (E14-A49) a escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI (2000), Ortofotos, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI (2001), Cuaderno estadístico delegacional Milpa Alta, Distrito Federal, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, 156 p.
- Jenny, H., (1941), Factors of Soil Formation, Ed. Mac Graw-Hill Book Company.
- Krasilnikov , P. V., N. E. García-Calderón, S.N. Sedov, E. Vallejo-Gómez y R. Ramos-Bello, (2005), *The relationship between pedogenic and geomorphic processes in mountainous tropical forested area in Sierra Madre del Sur, Mexico*, Catena 62: 14-44.
- Leamy, W. L., (1984), Andisols of the world. Congreso Internacional de Suelos Volcánicos, Comunicaciones, Universidad de La Laguna Secretariado de Publicaciones, serie informes, vol 13, pp.368-387
- Lepsch, I. F., Boul, S. W. and Daniels, R. B., (1977), *Soil-landscape relation in Occidental Plateau of Sao Paulo, Brazil: I. Geomorphic surfaces and mapping units*, Soil Sci. Soc. Am. J. 41: 104-109.
- Lugo, H. J., (1984), Geomorfología del sur de la Cuenca de México, Instituto de Geografía, UNAM, México, Serie Varia 1 (8) 46 p.
- Lugo, H. J. (1988), Elementos de geomorfología aplicada (Métodos cartográficos), Instituto de Geografía, UNAM, México.
-

- Malo, D. D., Worcester, B. K., Cassal, D. K. and Matzdorf, K. D., (1974), *Soil-landscape relationships in a closed drainage system*, Soil Sci. Am. Proc., 38: 813-818.
- Martin, P. A., (1980), *Vulcanología de la Sierra Chichinautzin*, tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 131 p.
- Milne, G., (1935), *Some suggested units of classification and mapping particularly for East African soils*. *Soil Res.* 4:183–198.
- Morgan, R., P. C., (1979), *Soil erosion*, Ed. Longman, New Cork, 113 p.
- Morrison, R.B., (1967), *Principles of Quaternary stratigraphy*, In: Morrison, R.B. and Wright, H.E., Editors, 1967. *Quaternary Soils. Proc. Internat. Assoc. Quat. Res. 7th Cong.* vol. 9, Desert Research Institute, Univ. of Nevada, Reno, pp. 1–69.
- Moustakas, N. K. and F. Georgoulas, (2005), *Soils developed on volcanic materials in the island of Thera, Greece*, *Geoderma* 129 (3-4): 125-138.
- Munsell, (1994), *Soil Color Charts*, Ed. Macbeth Division of Kollmorgen, Instruments Corporation, New Windsor, NY. United States of America.
- Naranjo Arias J. L., J. Jiménez Mendoza, R. Ramírez Hernández, V. Tena Carranza, E. Robles Becerril, R. Montiel Pérez y E. Molina Ramos, (2002), *Programa de manejo forestal persistente para Pino (*Pinus hartweggi* y *Pinus Montezumae*) y oyamel (*Abies religiosa*) en 5,000.00 ha de bosque comunal en Milpa Alta, Servicios Forestales y Ambientales, México, 150 p.*
- Oseguera, Z. J., (1991), *Algunos estudios de suelos derivados de cenizas volcánicas y andosoles de la meseta Tarasca, en Zacán, municipio de Los Reyes, estado de Michoacán*, Tesis Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, UNAM. México. 105 p.
- Paton, T. R., Humphreys, G. S., and P. B. Mitchell, (1995), *Soils: A new Global View*. New Haven; CT; Yale University Press:

- Parsons, R. B., Balster, C. A. and Ness, A. O., (1970), *Soil development and geomorphic surfaces, Willamette Valley, Oregon*, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 34: 485-491.
- Peña, V. M. L. (1980), Alófono y minerales amorfos y sus relaciones con los andosoles y suelos de origen volcánico en Veracruz, Tesis de Maestría en Ciencias (Biología), Facultad de Ciencias, UNAM, México 78 p.
- Ramos, L. A., (2000), Florística y vegetación del zacatonal subalpino localizado en la triangulación entre los volcanes Tulmiac, Tláloc y Yecahuazac en la sierra Chichinautzin, sur de la Cuenca de México, Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 69 p.
- Rodríguez, G. M. L. (2001), Diagnóstico Ambiental de la Zona Lacustre de Tláhuac, Tesis de Maestría en Ciencias (Biología), Facultad de Ciencias, UNAM, México, 109 p.
- Rodríguez-Gamiño, M. L. y J. López-Blanco, (2005), Caracterización de Unidades Biofísicas a partir de Indicadores Ambientales en Milpa Alta, Centro de México, *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, núm 60, pp. 46-61.
- Ruhe, R.V., (1956), *Geomorphic surfaces and the nature of soils*, Soil Sci. 82:441-455.
- Ruhe, R. V., (1960), *Elements of the soil landscape*, Trnas. 7th, Int. Congreso Soil Sci., Madison, CISC 4: 165-170
- Ruhe, R. V., (1969), *Quaternary Landscapes in Iowa*. Iowa, State Univ. Press. Ames, Iowa, 255 p.
- Salinas S. S. (2005), Mapeo morfogenético y análisis cuantitativo del deposito de avalancha de detritos del Volcán Jocotitlán, Estado de México, Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, 153 p.
- Schaetzl, R. J., S. Anderson, (2005), *Soils. genesis and geomorphology*. Ed. Cambridge University Press. 817 p.
- Schoeneberger, P. J., D. A. Wysocky, E. C. Benham, and W. D. Broderon (eds.), (2002), *Field Book for Describing and Sampling Soils, Versión 2.0 NRCS*, Lincoln, NE.

- SEMARNAT, (2002), Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (SEMARNAT), Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. 31 de diciembre de 2002. 73 p.
- Shoji, S., M. Nanzyo, R. Dahlgren, (1993), Volcanic ash soils. Genesis, Properties and Utilization, Elsevier. Amsterdam-London-New York-Tokyo, 288 p.
- Short Sr. Nicholas M. y Blair, Jr. Robert W., (1986), Geomorfología desde el espacio, *National Aeronautics and Space Administration (NASA) publications*.
- Siebe, C. Arana-Salinas, L. Abrams, M., (2005), *Geology and radiocarbon ages of Tlálloc, Tlacotenco, Cuauhzin, Hijo del Cuauhztin, Teuhkli, and Ocusacayo monogenetic volcanoes in the central part of the Sierra Chichinautzin, México*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 141: 225-243.
- Smeck, N. E., E. C. Runge and E. E. Mackintosh, (1983), *Dynamics and genetic modeling of soil systems*, In: Wilding, L.P., Smeck, N.E., Hall, G.F. (Eds.), *Pedogenesis and Soil Taxonomy: I. Concepts and Interactions*. Elsevier, Amsterdam, pp. 51-81.
- Soil Survey Staff, (1999), *Soil Taxonomy: a basic system of soil classification for marking and interpreting soil survey; Agriculture handbook 436, 2a ed.*, US Department of Agricultura and Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Stone, J. R., J. W. Gilliam, D. K. Cassel, R. B. Daniels, L. A. Nelson y H. J. Kleis, (1985), *Effect of soil erosion and landscape position on the productivity of Piedmont soils*, Soil Sci. Soc. Am. J., 49, pp. 987-991
- Tapia-Varela, G. y J. López-Blanco, (2002), Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1:100,000, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 19, núm. 1, pp. 50-65.
- Terradas, J., (2001), *Ecología de la vegetación*, Ed. OMEGA, 703 p.
- Toscana, A., (1998), *Análisis geomorfológico detallado del Volcán Ajusco y zonas adyacentes*, Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

- Tricart, J., (1982), *Ecogeography and Rural Management*, Ed. Longman Scientific and Technical, England, 162 p.
- Trudgill, S. T., (1983), *Soil Geography: Spatial techniques and geomorphic relationships*, in *Progress in Physical Geography*, pp. 343-360.
- Tsui C. C., Z. S. Chen and C. F. Hsieh, (2004), *Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan*, *Geoderma* 123: 131-143.
- Valera, P. M. A. (1993), *Fisicoquímica y mineralogía de andosoles de la región de Teziutlán, estado de Puebla*, Tesis de Maestría en Ciencias (Edafología), Facultad de Ciencias, UNAM, México, 295 p.
- Van Zuidam, R., (1985/1986), *Aerial Photo-Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphological Mapping*, Smits Publishers, The Netherlands, 442 p.
- Vela-Correa, G. y D. Flores Roman, (2004), *Morfogénesis de suelos con capas endurecidas de la Sierra de Guadalupe, México*, *Terra Latinoamericana* 22, 3: 255-266.
- Vela-Correa, G., B. E. Vázquez-Martínez, M. L. Rodríguez-Gamiño, I. V. Domínguez-Rubio, (2007), *Caracterización edáfica de sitios con regeneración natural de Pinus montezumae Lamb. en el volcán la Malinche, México*. *Agrociencia* 41: 371-383.
- Verstappen, H. Th., (1983), *Applied geomorphology; geomorphological surveys of environmental development*, Amsterdam, Elsevier, 437 p.
- Verstappen, H. Th. and R. A. van Zuidam (1991), *The ITC system of geomorphologic survey: a basis for the evaluation of natural resources and hazards*, ITC Publication, 10, 89 p.
- Wada, K. 1985. *The distinctive properties of Andisols*. *Advanced Soil Science* 2: 173-229.
- Walkley, A. and I. A. Black (1934), *An examination of the Degtjareft method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method*, *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Wood, A., (1942), *The development of hillside slopes*, *Proceedings of the Geologists Association of London*. 53: 128-138.

Wysocki, D.A., Schoeneberger, P.J., LaGarry, H.E., (2000), *Geomorphology of soil landscapes*, In: M. E. Sumner, (Ed.), CRC Handbook of soil science. CRC Press, New York, pp.1-39.