

00361

Jy.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

MORFOGENESIS DE CAPAS ENDURECIDAS DEL CUATERNARIO EN EL NOROESTE DEL ESTADO DE MORELOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE MAESTRIA EN CIENCIAS ( B I O L O G I A ) P R E S E N T A : CARLOS SEGUNDO ISLAS VEGA

DIRECTOR: DR. DAVID FLORES ROMAN

263364

MEXICO, D. F.

1998

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**DEDICATORIA**



**A mi esposa Leticia Emma por su comprensión, amor y apoyo.**

**A mis hijas Emma Leticia y Jéssica Anayensy  
fuente de fortaleza y motivación.**

## **AGRADECIMIENTO**

**A la Universidad Nacional Autónoma de México, en particular a la Facultad de Ciencias por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.**

**Al Instituto de Geología, Departamento de Edafología y al laboratorio de Fertilidad de Suelos, por haberme permitido realizar los trabajos para esta tesis.**

**A los miembros del jurado:**

**Dr. David Flores Román, Dr. Jorge E. Gama Castro, M. en C. Otilio Arturo Acevedo Sandoval, Dr. Hermilio Navarro Garza, Dr. Mario Arturo Ortiz Pérez, Dra. Teresa de Jesús Reyna Trujillo y Dr. Luis Silva Mora.**

**Deseo expresar profundo agradecimiento al Dr. David Flores Román por su valiosa dirección, apoyo y orientación para mi formación y realización de esta tesis.**

**A la M. en C. Arelia González Velázquez y al Sr. Jorge René Alcalá Martínez por su apoyo y colaboración.**

**Al Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por la facilidades brindadas para la determinación de resistencia a compresión simple.**

**Al Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología por su colaboración en la determinación de óxidos totales, así mismo a la Química Patricia Altuzar Coello, por la determinación mineralógica.**

**A los estudiantes de Posgrado: Alma S. Velázquez Rodríguez, Lucy M. Mora Palomino, Gilberto Vela Correa por su apoyo y orientación.**

**Agradecimiento muy especial al Sr. Pedro Avilés Jaimés por su apoyo en determinación de los análisis de laboratorio**

**Al personal de la Secretaria de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural ( SAGAR ): C. Ings. Carlos Ramírez Salazar, Luis Carlos Najar Estrella, José Luis Plaza Sánchez, Rigoberto Montelongo Flores, Virgilio Gutiérrez Delgadillo y muy especialmente al Ing. Gilberto Equihua Hernández y Dr. Jesús Takeda Inuma por las oportunidades brindadas para la realización de mis estudios de posgrado y de esta tesis.**

**A los Lic. Gonzalo Lazcano Alvarez y Rigoberto Rodríguez Delgado por su apoyo en los trabajos de cómputo y dibujo.**

**INDICE****Pagina.****RESUMEN.**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUCCION.</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2. REVISION BIBLIOGRAFICA.</b>  | <b>3</b>  |
| 2.1. Importancia.  | 3         |
| 2.2. Suelos del área de estudio.   | 7         |
| 2.3. Antecedentes sobre tepetates.   | 10        |
| 2.3.1. Etimología de la palabra tepetate.  | 12        |
| 2.3.2. Cronología del conocimiento sobre tepetates.                                    | 14        |
| 2.4. Clases de tepetates o capas endurecidas.  | 19        |
| 2.5. Distribucción de tepetates (capas endurecidas).                                   | 20        |
| 2.6. Formación de las capas endurecidas.   | 26        |
| 2.6.1. Características Físicas, Químicas,<br>Mineralógicas y Microbianas.              | 31        |
| 2.6.1.1. Físicas.  | 31        |
| 2.6.1.2. Químicas.   | 34        |
| 2.6.1.3. Mineralógicas.  | 35        |
| 2.6.1.4. Microbianas.  | 35        |
| 2.7. Incorporación de las capas endurecidas (tepetates) al<br>proceso productivo.      | 37        |
| <b>3. INVESTIGACION SOBRE SUELOS CON TEPETATES EN<br/>    EN EL ESTADO DE MORELOS.</b> | <b>45</b> |
| 3.1. Caracterización y morfogénesis de las capas<br>endurecidas(tepetates).            | 45        |
| 3.2. Ensayos con especies vegetales en la recuperación<br>de tepetates.                | 48        |
| 3.3. Incorporación de los tepetates al proceso productivo.                             | 49        |

|  | <b>Pagina.</b> |
|--|----------------|
| <b>4. HIPOTESIS DE TRABAJO.</b>  | <b>50</b>      |
| <b>5. OBJETIVOS.</b>   | <b>50</b>      |
| 5.1. Objetivo general.   | 50             |
| 5.2. Objetivo específicos.   | 51             |
| <b>6. CARACTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO.</b>                               | <b>52</b>      |
| 6.1. Localización del Area de Estudio.                                       | 56             |
| 6.2. Relieve.  | 56             |
| 6.3. Fisiografía.  | 59             |
| 6.4. Geología.   | 59             |
| 6.5. Hidrología.   | 63             |
| 6.6. Clima.  | 64             |
| 6.7. Suelo.  | 72             |
| 6.8. Vegetación.   | 73             |
| <b>7. MATERIAL Y METODO.</b>   | <b>75</b>      |
| 7.1. Estudio de gabinete.  | 75             |
| 7.1.1. Determinación del área de estudio por cartografía y teledetección.    | 75             |
| 7.2. Trabajos de campo.  | 76             |
| 7.2.1. Ubicación de los sitios de muestreo en campo y obtención de muestras. | 76             |
| 7.2.1.1. Recorrido preliminar.   | 76             |
| 7.2.1.2. Verificación y ubicación de los sitios a muestrear.                 | 76             |
| 7.2.1.3. Descripción de perfiles de suelo.                                   | 77             |
| 7.2.1.4. Prueba de infiltración.   | 78             |
| 7.2.1.5. Obtención de núcleos inalterados.                                   | 78             |
| 7.2.1.6. Características morfogenéticas.                                     | 78             |
| 7.2.1.7. Clasificación morfológica de campo.                                 | 78             |

|   | <b>Pagina</b> |
|---|---------------|
| 7.3. Análisis de laboratorio.   | 79            |
| 7.3.1. Análisis Físicos.  | 79            |
| 7.3.2. Análisis Químicos.   | 81            |
| 7.3.3. Análisis Mineralógico.   | 82            |
| <b>8. RESULTADOS Y DISCUSION.</b>   | <b>83</b>     |
| 8.1. Teledetección.   | 83            |
| 8.2. Clasificación morfológica de campo.  | 83            |
| 8.2.1. Desarrollo relativo de horizontes(DRH).  | 83            |
| 8.2.2. Desarrollo relativo del perfil(DRP).   | 90            |
| 8.3. Propiedades diagnósticas principales.  | 90            |
| 8.3.1. Propiedades físicas.   | 90            |
| 8.3.1.1. Distribucción del tamaño de partícula.   | 90            |
| 8.3.1.2. Esfericidad y redondez de las partículas minerales.                                    | 94            |
| 8.3.1.3. Densidad aparente, densidad real y porosidad total.                                    | 95            |
| 8.3.1.4. Caracterización del espacio poroso.  | 95            |
| 8.3.1.5. Resistencia a la compresión no confinada.  | 100           |
| 8.3.2. Propiedades hidrológicas.  | 103           |
| 8.3.2.1. Estabilidad de fragmentos de capas endurecidas por inmersión en agua.                  | 103           |
| 8.3.2.2. Estabilidad de fragmentos de capas endurecidas por inmersión en KOH concentrado (30%). | 103           |
| 8.3.2.3. Infiltración.  | 104           |
| 8.3.2.4. Conductividad hidráulica.  | 109           |
| 8.3.3. Análisis químico.  | 110           |
| 8.3.3.1. Pérdidas y ganancias de óxidos totales.  | 113           |
| 8.3.3.2. Relaciones molares.  | 118           |
| 8.3.3.3. Oxidos libres.   | 120           |

|   | <b>Pagina</b> |
|---|---------------|
| 8.3.3.4. Microanálisis del cementante.                          | 120           |
| 8.3.4. Análisis mineralógico.                                   | 122           |
| <b>9. GENESIS DE SUELOS, CAPAS ENDURECIDAS Y CLASIFICACION.</b> | <b>125</b>    |
| 9.1. Morfogénesis.  | 125           |
| 9.2. Génesis de los suelos.                                     | 125           |
| 9.3. Formación de las capas endurecidas.                        | 126           |
| 9.4. Caracterización Taxonómica de los suelos.                  | 128           |
| 9.4.1. Clasificación FAO-UNESCO.                                | 128           |
| 9.4.2. Soil Taxonomy  | 128           |
| <b>10. CONCLUSIONES.</b>  | <b>131</b>    |
| <b>11. LITERATURA CITADA.</b>                                   | <b>134</b>    |
| <b>12. ANEXOS.</b>  | <b>150</b>    |



**RESUMEN.**

Los tepetates son capas endurecidas del suelo con diferentes grados de cementación, Flores *et.al.*, (1991), considera que desde el punto de vista agronómico, son importantes porque limitan la penetración de las raíces de los cultivos, reduce el paso del agua al subsuelo y provoca el drenaje lateral interno y un mayor escurrimiento superficial que conlleva la pérdida de materiales y componentes minerales del suelo, provocando su empobrecimiento y erosión.

Flores *op. cit.*, cuantifican que existe alrededor del 30% de la superficie total del país con este problema. México tiene el 80% de su superficie con diferentes grados de erosión e igualmente el estado de Morelos (SARH 1987 ).

La investigación, se ubica en la parte noroccidental del estado de Morelos, al norte de Buenavista del Monte, Edo. de Morelos. Los objetivos específicos del trabajo son:

1. Caracterizar morfológica y taxonómicamente los suelos y las capas endurecidas (duripanes y fragipanes).
2. Generar información sobre la génesis de las capas endurecidas y de los suelos.
3. Contribuir al conocimiento de las capas endurecidas del estado de Morelos.

En trabajo, inicio con la recopilación de información básica, donde se investigó el grado de avance sobre el conocimiento de los capas endurecidas en México y en el Mundo. Fueron evaluadas la calidad, nivel de trabajo y los resultados obtenidos, así como la selección de cartografía adecuada para la determinación del lugar de estudio y proceder a ubicar los sitios de realización de los perfiles tipo. Posteriormente, efectuaron los estudios de gabinete, trabajo de campo y análisis de laboratorio de las propiedades físicas, químicas y minerales.

Con los resultados, se procedió a su ordenación y clasificación por la metodología de FAO/UNESCO (1994) y Soil Taxonomy (1994).

La clasificación morfológica de campo, dio valores medios que corresponden a suelos medianamente desarrollados. La velocidad de infiltración presento valores en el primer minuto de 24 a 61 cm/hr en los suelos superficiales, y en las capas endurecidas de 6 a 24 cm/hr. Al cabo de 120 minutos ambos valores tendieron a disminuir, registrandose en los suelos rangos de 0.4 a 18 cm/hr, y en las capas endurecidas de 0.0 a 6 cm/hr.

En los tiempos inicial y final de observación, los valores de la parte superior de los suelos, la velocidad de infiltración fue mayores en mas de un 300% en promedio, que las capas endurecidas.

En la acumulación de infiltración de la parte superior de los perfiles, los valores oscilaron de 0.41 a 1.0 cm/hr y en las capas de 0.10 a 0.40 cm/hr en primer minuto. Después de los 120 minutos, los valores se incrementaron en ambos casos, registrandose los valores en las superficies de 6.40 a 28 cm/hr, mientras en las capas endurecidas fueron de 2.10 a 7.90 cm/hr.

La conductividad hidráulica de la parte superior de los perfiles de suelos fue mayor en un 49% que en las capas endurecidas, registrandose en estos de 0.40 a 0.70 cm/hr mientras en las capas endurecidas de 0.30 a 0.38 cm/hr.

Los contenidos de arcilla fueron del 30 a 72% en el PIII-1, del 9 a 59% para el PIII-2, del 38 a 74 % para el PIII-3 y del 11 a 29% para el PIII-4. Cabe señalar que en la parte media de la profundidad de los perfiles, se encontraron las mayores concentraciones de arcilla que oscilaron del 30 a 73%.

La densidad aparente se incremento en todos los perfiles a mayor profundidad, y fue de un 37% a 60% e inversamente proporcional al espacio poroso. Los valores fueron de 1.15 a 1.85 g/cm<sup>3</sup> y el porcentaje de porosidad total del 47 hasta 22%. Los poros fueron muchos mas de 200/dm<sup>2</sup> de diámetro muy fino, continuos de distribución imped con morfología intersticial y con modificadores abiertos.

Los valores más altos de densidad aparente fueron en las capas endurecidas registrándose de 1.59 a 1.82 g/cm<sup>3</sup>. Los valores de los perfiles en su horizonte superficial fue de 1.15 a 1.20 g/cm<sup>3</sup>.

Al analizar los materiales en el microscopio de la forma que fueron recolectadas en el campo, se mostraron valores altos de esfericidad y redondez, lo que es indicativo de precipitación y agregación más que abrasión, así como, de la existencia de materiales piroclásticos.

Las pruebas de resistencia a la compresión no confinada, demostraron que se requiere de un mayor esfuerzo para colapsar un núcleo de duripán que un fragipán debido al mayor contenido de sílice de los primeros. Los valores de esfuerzo oscilaron de 2.8 a 22 kg/cm<sup>2</sup>. En inmersión en agua de los núcleos, los perfiles PIII-1 y PIII-2 se colapsaron entre los 2 y 5 minutos de iniciada la prueba. Los otros reaccionaron con KOH concentrado al 30% de los 5 a 15 minutos de inmersión quedando colapsados a los 30 minutos aproximadamente.

Los suelos se originaron a partir de tobas y depósitos clásticos. El duripán es de origen geológico con aportes pedogénéticos secundarios. Los suelos son clasificados como Luvisoles Crómicos de acuerdo a la clasificación FAO-UNESCO (1994) y Soil Taxonomy (1994), clasifica a los perfiles PIII-1 y 2 como Alfisoles del Gran Grupo Fragiudalfs, al PIII-3 como Durustalfs y al PIII-4 queda comprendido dentro del orden de los Inceptisoles, suborden Ocrepts y del Gran Grupo Durocrepts.

## **1. INTRODUCCION.**

La diferente variabilidad climática y de suelos que existen en el territorio Nacional, influenciados por otros factores de formación de los mismos y teniendo una destacada participación el factor topográfico de nuestro país, hacen que la apertura continua de tierras al cultivo con fuertes pendientes, combinada con la acción de los diferentes agentes erosivos y el uso de prácticas de manejo de suelo y vegetación inadecuadas, conlleven a la actuación de los diferentes procesos de degradación que influyen en el deterioro de los recursos involucrados.

Existen factores ambientales de degradación física y química que involucran la formación de capas endurecidas que afecta a los suelos e impiden su buen aprovechamiento e incorporación al proceso productivo. El estudio de su formación de las capas endurecidas originadas por consolidación, compactación y cementación (fragipanes y duripanes), es un fenómeno que no es muy conocido, que involucra principalmente en su formación a materiales de origen volcánico donde influyen procesos diagenéticos y pedogenéticos.

Las capas endurecidas, comúnmente conocidas en nuestro país como tepetates, se identificaron desde la época prehispánica por la cultura **Náhuatl**. Con el transcurso del tiempo y con la explosión demográfica que incrementa la degradación de los suelos, en el territorio Nacional, se ha aumentado su superficie. Flores, *et al.*, 1991, cuantifican que existe alrededor del 30% de la superficie total del país con este problema de degradación.

El endurecimiento de los suelos, no es exclusivo del territorio Nacional, si no que existen en todos los países de América Latina, Norte de América y Europa. Se les conoce a estos materiales con diferentes nombres y de acuerdo a su elemento cementante se deriva su nombre.

En América Latina, es muy común que los suelos de origen volcánico de zonas templadas tiendan a presentar capas endurecidas en su perfiles, por los grandes contenidos de sílice que tienen en diferentes formas, que por alteración del material de origen tiende a disolverse y acumularse, para dar origen a procesos pedogenéticos que tienden a la formación de las capas endurecidas.

Los estudios realizados en México, tratan de explicar los procesos que implican la dinámica del endurecimiento en los suelos, diferenciándose las siguientes fases:

- La consolidación de las partículas minerales y orgánicas que provocan compactación
- La soldadura de los materiales de origen piroclástico.
- Cementación por procesos pedológicos originados por los cementantes en solución.

Los elementos cementantes pueden variar y pueden ser la sílice, los óxidos de hierro y aluminio, carbonatos de calcio, sulfatos de calcio, arcilla y materia orgánica. (Miehlich, 1984; Nimlos, 1989; Dubroeuq, *et al.*, 1989; Creutzberg, *et al.*, 1990; Zebrowski, 1991; Flores, *et al.*, 1991 y 1996 )

El presente estudio, se ubica en la parte noroccidental del estado de Morelos, al norte del poblado de Buenavista del Monte. En el mismo, se estudiaron cuatro perfiles de suelos: PIII-1, PIII-2, PIII-3 y PIII-4 a los cuales se les realizaron estudios físicos, químicos, hidráulicos y mineralógicos tanto a los suelos como a los materiales endurecidos.

Este estudio, corresponde a un proyecto de investigación del Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de México dirigido por el Dr. David Flores Román, donde tiende aportar conocimientos básicos y aplicados sobre su caracterización, génesis, recuperación e incorporación al proceso productivo en las áreas que presentan este problema de degradación.

## 2. REVISION BIBLIOGRAFICA.

Los suelos que presenta el área de estudio son un proceso de formación donde interactúan los factores bióticos y abióticos, destacando para su formación los materiales geológicos, relieve, organismos y tiempo. Tales factores han permitido su génesis o donde ha actuado la mano del hombre en su modificación por procesos degradativos, originando la pérdida de la capa arable cuando son suelos agrícolas, o la perturbación de los suelos forestales en su explotación no planificada.

### 2.1. Importancia.

Flores *et al.*, (1991), considera que desde el punto de vista agronómico, el tepetate es muy importante porque limita la penetración de las raíces de los cultivos, reduce el paso del agua al subsuelo y provoca el drenaje lateral interno y un mayor escurrimiento superficial que conlleva con la pérdida de materiales y componentes minerales del suelo, provocando su empobrecimiento y erosión. En la figura 1, se puede observar el proceso progresivo de la erosión en un suelo arcilloso y la exposición de la capa endurecida.

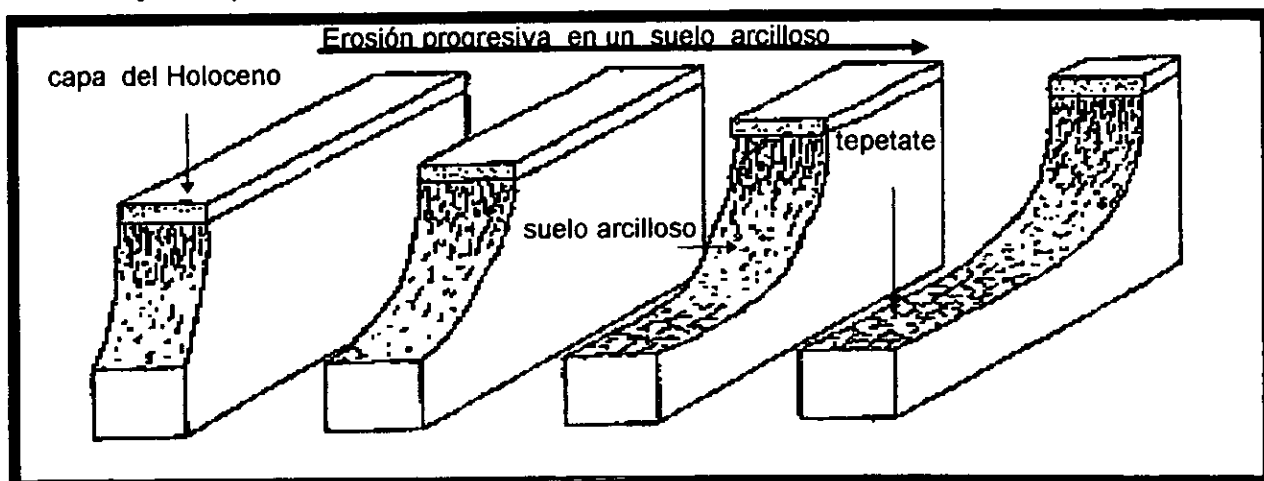


Figura 1. Formación de un tepetate en una capa de sedimento de toba.

Fuente: Wagner, 1992.

Bocco y Garcia (1992), señalan que la erosión de los suelos afecta a 35% de la superficie del mundo en diferentes grados de erosión, una de las regiones con mayores problemas es América Latina, México es uno de los países más afectados. Algunos inventarios sobre erosión demuestran que existe del 65 al 85 por ciento de la superficie del territorio Nacional con diferentes grados de erosión. La erosión muy severa la cuantifican en un 2 al 9 por ciento de la superficie del país, (Estrada y Ortiz, 1982; Garcia Lagos, 1983; Vazquez, 1986; Geissert and Rassignol, 1987).

Los inventarios de erosión realizados por la extinta Dirección General de Conservación de Suelo y Agua de SARH, (1987), (hoy SAGAR), nos señalan que el 80% de la superficie del país (155.6 millones de hectáreas) evidencian algún problema de erosión ( cuadro 1).

Por otra parte, también se determinó que en el país se pierden en promedio 2.8 toneladas de suelo por hectárea anualmente como sólidos en suspensión, lo que a su vez representa una pérdida total de suelo de 535 millones de toneladas por año, de este volumen, el 69% se descarga en el mar y el 31% restante ( 66 millones de toneladas por año) se deposita en obras de almacenamiento o lagunas naturales, provocando una reducción en la capacidad de almacenamiento del agua, de aproximadamente del 0.13 %.

Con referencia a la productividad de los suelos, la erosión en México ha provocado una reducción del 33%, cifra que resulta demasiado elevada desde cualquier punto de vista que se considere. Cabe señalar que existe tasas de formación de los suelos, donde Bennett (1939), [(citado en el Manual de conservación de suelos y del agua (1977)] indica que se requieren 300 años en condiciones naturales para formar una capa de 25 mm de suelo. Y que en condiciones de laboreo agrícola, pastoreo y explotación forestal, el tiempo se reduce en 30 años, indicando una pérdida máxima permisible de suelo de 1.8

ton/ha/año, esto en suelos de condiciones favorables. En suelos someros y con capas endurecidas la pérdida máxima permisible de pérdida de suelos sería de 0.4 ton/ha/año. El Servicio de Conservación de Suelos de los estados Unidos Americano (1977). Propuso los límites que varía de 2.5 a 12.4 ton/ha/año y son en función de la profundidad y tipo de material parental del suelo.

Cuadro 1. Superficie afectada en diferentes grados de erosión.

| Entidad        | Area Total      | No. Manifiesta | Grados de Erosión del Suelo |                |                |               |
|----------------|-----------------|----------------|-----------------------------|----------------|----------------|---------------|
|                |                 |                | Leve                        | Moderada       | Severa         | Muy severa    |
| Aguascalientes | 558.9           | 65.1           | 63.9                        | 188.4          | 179.1          | 17.8          |
| Baja C. Nte.   | 7011.3          | 1227.0         | 1438.0                      | 2326.3         | 1831.6         | 162.1         |
| Baja C. Sur    | 7366.7          | 484.8          | 1607.8                      | 2522.1         | 2219.0         | 355.2         |
| Campeche       | 5183.3          | 4579.3         | 566.0                       |                |                |               |
| Coahuila       | 15157.8         | 356.3          | 7049.2                      | 6344.2         | 1228.6         | 97.2          |
| Colima         | 545.5           | 88.0           | 344.9                       | 96.9           |                |               |
| Chiapas        | 7388.7          | 4557.0         | 2124.4                      | 477.4          | 64.3           |               |
| Chihuahua      | 24708.7         | 4427.3         | 4250.2                      | 13187.7        | 2109.0         | 680.8         |
| Distrito F.    | 149.9           | 26.8           | 61.6                        | 12.5           | 1.4            |               |
| Durango        | 11964.8         | 1170.3         | 4078.9                      | 5511.6         | 862.8          | 298.3         |
| Guanajuato     | 3058.9          | 1027.0         | 505.8                       | 873.7          | 382.8          | 217.9         |
| Guerrero       | 6379.4          | 1255.3         | 1978.4                      | 2500.4         | 559.7          |               |
| Hidalgo        | 2098.7          | 503.4          | 746.2                       | 669.9          | 147.9          | 19.8          |
| Jalisco        | 8013.7          | 1048.3         | 3318.7                      | 2101.9         | 1320.0         | 67.0          |
| México         | 2146.1          | 510.1          | 906.2                       | 642.7          | 30.8           | 6.7           |
| Michoacán      | 5986.4          | 1241.5         | 2246.8                      | 1912           | 441.0          |               |
| Morelos        | 494.1           | 90.9           | 253.6                       | 117.8          | 23.3           |               |
| Nayarit        | 2762.1          | 818.5          | 1218.9                      | 607.1          | 76.2           | 6.6           |
| Nuevo Leon     | 6455.5          | 194.3          | 1004.4                      | 4373.7         | 809.1          | 49.6          |
| Oaxaca*        | 9421.1          | 1413.2         | 1413.2                      | 1884.2         | 1884.2         | 2826.3        |
| Puebla         | 3391.9          | 102.1          | 1922.8                      | 850.6          | 357.2          | 131.4         |
| Querétaro      | 1176.9          | 197.3          | 345.0                       | 322            | 287.8          | 17.6          |
| Q. Roo*        | 5035.0          | 1611.2         | 1913.3                      | 503.5          | 251.8          | 755.3         |
| San Luis P.    | 6284.8          | 1145.2         | 1666.5                      | 2810.5         | 575.2          | 31.9          |
| Sinaloa        | 5809.2          | 1159.8         | 1058.0                      | 2476.2         | 1066.0         | 3.5           |
| Sonora         | 18493.4         | 1646.8         | 2507.5                      | 10869.6        | 3254.8         | 166.2         |
| Tabasco        | 2403.8          | 1593.8         | 596.3                       | 92.8           | 12.1           |               |
| Tamaulipas*    | 7960.2          | 2228.9         | 796.0                       | 2388.1         | 1353.2         | 1194.0        |
| Tlaxcala       | 391.4           | 16.6           | 70.6                        | 209.2          | 77.3           | 9.6           |
| Veracruz       | 7281.5          | 3603.6         | 3461.7                      | 96.2           | 1.8            | 1.0           |
| Yucatan*       | 3850.8          | 577.6          | 192.5                       | 1193.7         | 192.5          | 1694.3        |
| Zacatecas      | 7345.4          | 37.2           | 1000.3                      | 4189.5         | 1936.4         | 162.5         |
| <b>Total</b>   | <b>198718.3</b> | <b>39005.3</b> | <b>50708.2</b>              | <b>72352.4</b> | <b>23536.9</b> | <b>8972.6</b> |

Fuente: SARH-DGCSA. 1987. (SAGAR). La diferencia del total de los estados, corresponde a ciudades y cuerpos de agua.

\*Superficie estimada.



Por otro lado, el tepetate representa una forma grave de degradación del suelo y su dureza dificulta su manejo. La importancia del estudio de los tepetates cobra interés cuando las parcelas de los agricultores se encuentran enclavadas en este tipo de material de baja productividad, propiciando conflictos de tipo socio-económicos muy graves que los conducen al abandono de las actividades agropecuarias como principal fuente de ingresos y provocan la emigración a otras localidades. El tepetate combinado con un mal manejo y los problemas que ocasiona la deforestación con la pérdida de suelos y agua, conlleva a causar otros deterioros en otras áreas, tales como:

- ⇒ Afectación de los sistemas hidráulicos.
- ⇒ Contaminación de suelos.
- ⇒ Contaminación de los cuerpos de agua.
- ⇒ Extinción de la fauna acuática.
- ⇒ Disminución de la recarga de los acuíferos naturales.
- ⇒ Inundaciones en las partes bajas.

Estos problemas afectan también la zona urbana provocando:

- ⇒ Azolve en el sistema de drenaje y alcantarillado.
- ⇒ Contaminación ambiental.
- ⇒ Contaminación del aire por las partículas de polvo.

Sánchez *et al.*, (1987), manifiesta que es necesario conocer con mayor detalle el manejo racional de este tipo de material, por considerarse factible de recuperación mediante el estudio y el empleo de prácticas adecuadas de recuperación y conservación de las mismas, llegando a convertirse en productivas.

Ruiz (1987), opina que a los tepetates se les han dado diversos usos, ya sea con fines agropecuarios, forestales, ingeniería civil, artesanal y sobre todo en la construcción, en esta última, en forma de bloques en algunas casas particulares e iglesias antiguas, e incluso en construcciones modernas donde se alternan los tepetates blancos con tepetates amarillos. Generalmente en la construcción de habitaciones se utilizan como protección y decoración.

## **2.2. Suelos del área de estudio.**

Los suelos en el área son los Luvisoles de acuerdo a la Clasificación FAO-UNESCO(1994), sus equivalencias; Suelos Empardecidos Lavados en la Clasificación Francesa (1974) y Alfisoles en Soil Taxonomy(1994).

Birkeland (1974), refiriéndose a generalizaciones del mapa de suelos de USA 1968, describe a los Alfisoles como suelos con horizontes superficiales grises a pardos, un contenido medio a alto de abastecimiento de bases, y subhorizontes de acumulación de arcillas.

Ortiz (1980), señala que la palabra Luvisol es derivado de argilúvico y este del Latin luvii, luvio que significa lixiviar; Latin argilla, arcilla blanca; Latin, iluvium y quiere decir movimiento de arcilla hacia abajo y acumulación de arcilla, arg-il luvic. Fitzpatrick (1984), concluye que la palabra Latina luvium = lavar; connotativa de la acumulación de iluvial de arcilla. Los Luvisoles incluyen los suelos que poseen un horizonte B argílico, que tiene una capacidad de cambio igual o superior a 24 cm (+)Kg<sup>-1</sup> de arcilla, y un grado de saturación de bases por NH<sub>4</sub>OAc del 50% o mayor en la totalidad de los horizontes B<sub>1</sub> cuenta con un límite brusco inferior, sobre un horizonte lentamente permeable.

La Clasificación de FAO/UNESCO (1994), señala ocho subdivisiones de los Luvisoles: Ortico, Crómico, Cálxico, Vértico, Férrico, Albico, Gléyicos y Plínticos los cuales presentan sus características distintivas.

Duchaufour (1984), en la Clasificación Francesa, señala que los Luvisoles se encuentran ubicados dentro de la Clase 4 y Subclase VI que corresponde a los suelos Empardecidos templados "lavados", que tienen el proceso edafogénico "empardecimiento", característicos de las regiones de clima templado Atlántico o semicontinental cuya vegetación natural en las montañas bajas, es en bosques de frondosas o un bosque mixto de resinosas frondosas. Poseen un horizonte "lavados", con horizontes A y Bt, el grado de saturación de bases es siempre superior al 50% en el horizonte Bt, y siempre forma un horizonte argílico. Los suelos empardecidos pueden presentar las siguientes características del perfil del suelo, tener presente los siguientes arreglos de horizontes; A (B) C o A Bt C y los muy particulares que presentan los suelos lavados continentales o boreales. El perfil de nuestro interés es A Bt C que presentan los suelos empardecidos lavados de clima templado Atlántico o semicontinental.

Fitzpatrick (1984), los describe a los Alfisoles, como suelos que tienen un epipedón ócrico, un horizonte argílico y una saturación de bases de moderada a elevada; el agua es retenida a una tensión mayor a 15 bar cuando menos durante tres meses al año en la estación de crecimiento. Puede haber presente otros horizontes incluyendo un fragipán, un duripán, un horizonte nátrico, un horizonte petrocálico o plintita.

Buol *et al.*, (1989), señala que los Alfisoles satisfacen dos requisitos: a).-Una buena abundancia moderada de látices de arcilla cristalina y b).-Su acumulación en el subsuelo en cantidades suficientes para producir un horizonte arcilloso. La traslocación de la arcilla se ha hecho en condiciones ácidas o en condiciones alcalinas-sódicas, debido a la dispersión de las arcillas. Generalmente los

Luvisoles se encuentran en geoformas jóvenes, estables, de poca pendiente, planas o ligeramente onduladas, donde no han actuado de manera importante los procesos erosivos y las perturbaciones edáficas, por lo menos durante los últimos mil años. Sin embargo los suelos son suficientes jóvenes para retener reservas notables de minerales primarios, capas de arcillas y nutrientes disponibles para las plantas.

Aguilera (1989), define a los Alfisoles como suelos desarrollados de zonas tropicales, subtropicales y templadas, fuertemente interperizados en los cuales ha habido iluviación de hierro y aluminio, aunque tiene saturación de bases mayor que el 35%, tiene horizontes superficiales argílicos Bt. En México se distribuyen en amplias zonas de Tabasco, Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla, Michoacán y Jalisco así como en algunos estados del norte del País, donde la precipitación sea mayor de 800 mm.

Fanning (1990), con respecto al material parental, los Luvisoles se originan a partir de rocas básicas, intermedia o materiales sedimentarios consolidados, con una permeabilidad moderada que permite el paso del agua y el consecuente proceso de lavado. En su génesis, depósitos de tamaño del limo, arenas finas y arcillas, no así los materiales arenosos, ya que su alta porosidad propicia un lavado demasiado rápido, impidiendo la acumulación de los materiales arcillosos existentes y dando lugar a lixiviación.

También son comunes los Luvisoles desarrollados sobre materiales volcánicos, sobre todo de naturaleza básica, los cuales son fácilmente alterables, debido a su contenido alto de hierro y magnesio y bajo en sílice; aportan una buena cantidad de minerales secundarios. Además su permeabilidad permite el paso del agua y la consecuente traslocación de arcillas.

Los factores esenciales involucrados en su formación son el clima, organismos, el tiempo y el material parental, el cual aporta suficientes bases al perfil, así como minerales primarios que permiten la formación de arcilla. El clima actúa predominantemente en los procesos de alteración de minerales y en los de argilización.

En la génesis de estos suelos es importante el tiempo, para que se den los procesos de formación del horizonte argílico. Estos procesos son muy lentos y en consecuencia sumamente dependientes de este factor. Así, puede decirse que los Luvisoles son suelos con mayor desarrollo y evolución. De hecho estos suelos son antiguos han sido sepultados parcialmente por distintos eventos volcánicos, de tal manera que, en algunos casos, han sido rejuvenecidos, dando lugar a la formación de Feozems Lúvicos.

La clasificación Americana, Soil Taxonomy (1994), los considera del Orden Alfisol, en su definición agrega, que pueden tener otras características que son usadas para la clasificación de los Grandes grupos dentro de los órdenes. Algunos Alfisoles son muy húmedos durante una parte del año y tienen un epipedón úmbrico. Los porcentajes de carbono orgánico, arcilla y saturación de bases son típicos de Alfisol.

### **2.3. Antecedentes sobre Tepetates.**

Williams ( 1972), los cultivadores *Náhuatl* eran partidarios de manejar sus recursos físicos, incluyendo el recurso agrícola más importante de todos, el suelo. Su habilidad debe haberse basado en las observación realizada a lo largo

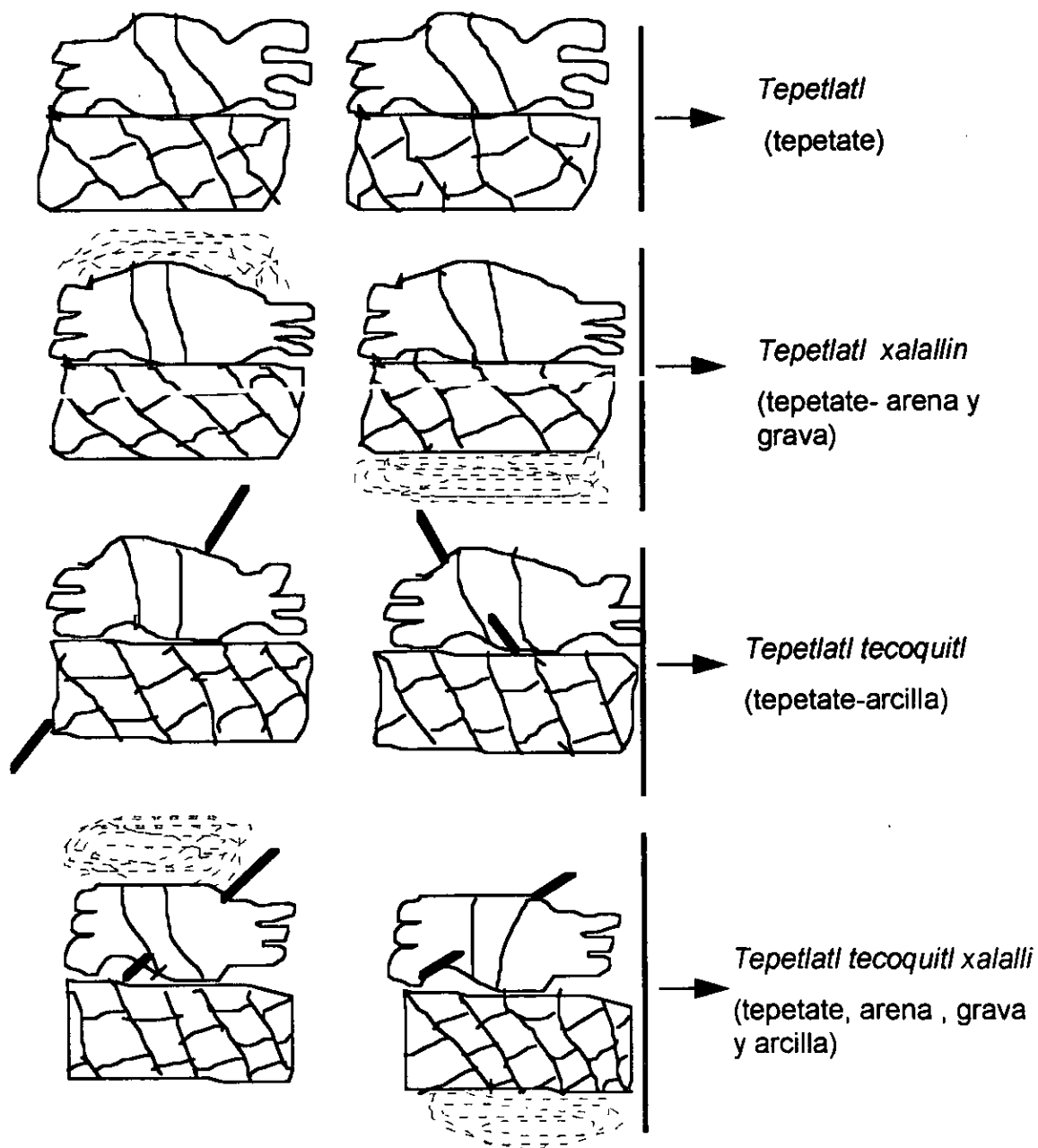


Figura 2. Variedades de Glifos **Náhuatl** representativos de tepetates, del códice de Santa María Asunción y del códice Vergara.

Fuente: Modificado de Williams, 1992.

de generaciones, de las características físicas de los suelos que producen cosechas abundantes y de los que no lo hacían, y en la respuesta de los suelos a

las intervenciones de los mismos cultivadores, adiciones de materiales orgánicos e inorgánicos, cultivo, respuesta a la irrigación y a cosas semejantes. Con el tiempo (Figura 2), su conocimiento tomó cuerpo de una clasificación de los suelos.

### **2.3.1. Etimología de la palabra tepetate.**

Pedológicamente el tepetate es definido como una capa o un horizonte cementado de color blanco, pardo a rojizo, de consistencia dura y textura desde arcilla hasta grava fina (Williams, B.J., 1972). Escobar (1981), define los tepetales como, tobas, rocas formadas por materiales de origen volcánico arrastradas y depositadas por el agua, generalmente son rocas de poco peso y fáciles de labrarse y señala que puede haber tobas porfídicas, traquíticas y basálticas. Indicando que el llamado tepetate, es una lava porosa gruesa. Agrega, que existen las tobas ígneas que son rocas conglomerados sin intervención del agua. Por la fragmentación de rocas de mas antigüedad que quedaron incluidas en un magma de fluido. Son rocas generalmente blandas.

El Diccionario Agropecuario de México, Inca. Rural., (1982), señala; piedra porosa y muy dura de color blanco amarillento, que cortada en bloques se usa en construcciones. Se compone esta piedra de sustancia arcillosa del mismo color. Tierra de mina que no contiene metal.

La palabra tepetate deriva del **Náhuatl** y ha sido utilizada por los campesinos y científicos de suelo actuales, para referirse a las capas endurecidas que afloran en los suelos agrícolas y forestales de sus localidades, el vocablo está compuesto por las raíces **teŋtŋ** que significa "piedra" y **petlatl**, "petate"; por lo cual, el significado etimológico es "petate de piedra" (Rojas y Sánchez, 1985).

Larousse (1986), define al tepetate como roca que se emplea para hacer casas, tierra que no tiene metal, sembrar en tepetate es predicar en el desierto.

A su vez, Hernandez (1987), opina que la palabra tepetate, de origen **Náhuatl**, puede utilizarse técnicamente ya que connota una condición específica de paisaje, es decir, la exposición o no de un material endurecido a la superficie del suelo.

Nimlos (1987a, 1987b, 1989 y 1990), los define como tobas de cenizas volcánicas que son comunes en la orilla del pacífico en los países de América Latina. En suma existen consolidados por procesos geológicos, y son pedológicamente cementados con sílice iluvial y algunas veces también con carbonato. Estos depósitos son llamados tepetates en México.

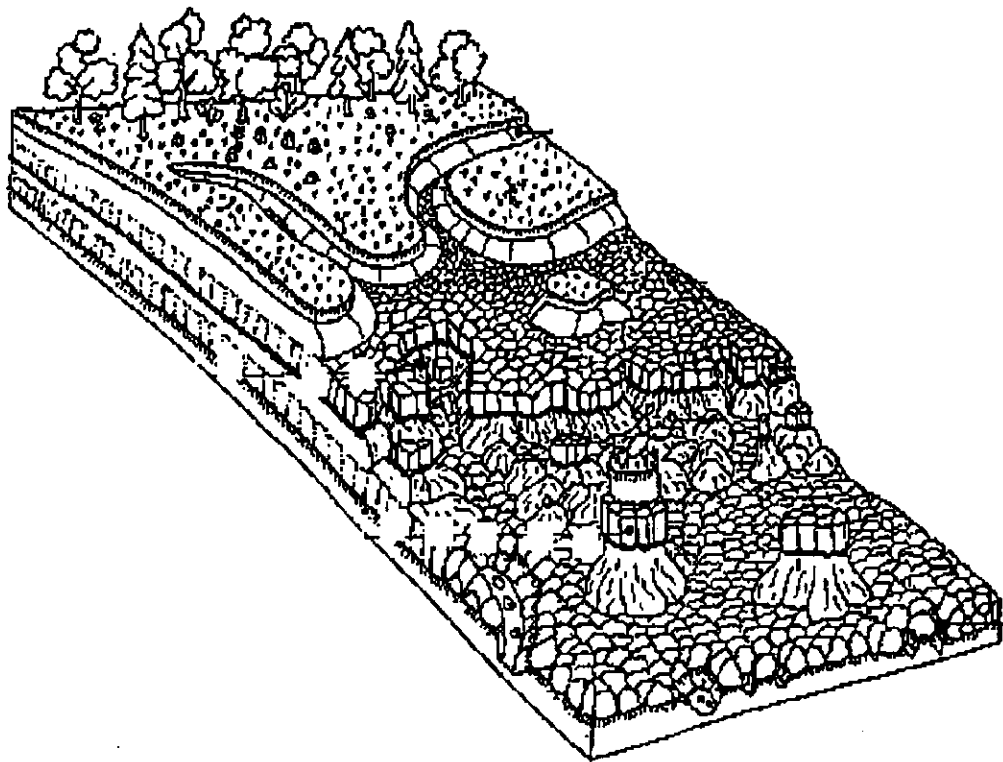


Figura 3. Morfogénesis de un Tepetate (duripán).

Fuente: Miehlich, 1992.



Agronómicamente a los tepetates se les identifica que son estratos endurecidos que en ocasiones afloran a la superficie y en algunos casos descansa sobre ellos una capa de suelo, la cual fue eliminada por fenómenos erosivos, como una consecuencia del mal manejo de los suelos, tanto agrícolas como pecuarios y forestales (Figura 3 ).

Desde el punto de vista científico, el tepetate es un horizonte endurecido del suelo. Involucra diferentes materiales tanto de origen geológico como edafogénico y se caracteriza por el grado de compactación y cementación que presenta. En el marco del primer Simposium Internacional sobre suelos volcánicos endurecidos (1991), se definen a los tepetates, como suelos volcánicos endurecidos con la finalidad de uniformizar el nombre en América Latina.

### **2.3.2. Cronología del conocimiento sobre tepetates.**

Pacheco (1979), menciona que los campesinos Mexicanos identifican a los tepetates por los diferentes colores que presentan, como; blancos o grises, amarillos y rojos.

Analizando el código vergara, Rojas y Sánchez (1985), se puede observar que desde la época prehispánica los tepetates fueron identificados y caracterizados por la cultura **Náhuatl**. En la figura 4, se puede apreciar la existencia de una serie de glifos que representan el conocimiento de las características físicas de los suelos, haciendo referencia principalmente a su textura. El primer glifo describe a la tierra y la presencia del tepetate, nombrándose en **Náhuatl**, "**Tepetlatl**". también se observa un glifo que describe al tepetate arenoso "**Tepetlatl Xalalli**", es de señalarse que nuevamente aparece en el primer lugar el suelo, después el tepetate y abajo de este la arena, es decir piroclastos, lo que significa que ya desde entonces se relacionaban estos materiales a un origen

volcánico; además, indicativo que el afloramiento de las capas duras en los suelos cultivables no era frecuente en esa época, pero si indicando el gran interés de esta cultura sobre el conocimiento de los suelos.





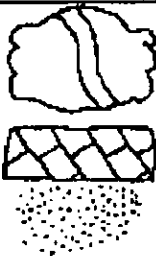
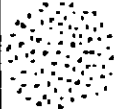
| Glifo   | Nombre en Náhuatl        | Traducción       | Glifo   | Nombre en Náhuatl | Traducción     |
|---|--------------------------|------------------|---|-------------------|----------------|
|    | <b>Tepetlatl</b>         | Tepetate         |    | <b>Atoctli</b>    | Aluvión        |
|   | <b>Tezoquitl</b>         | Tierra Arcillosa |   | <b>Teuhtloli</b>  | Tierra Limosa  |
|  | <b>Tepetlatl Xalalli</b> | Tepetate Arenoso |  | <b>Xalalli</b>    | Tierra Arenosa |

Figura 4. Glifos de suelos del código Vergara. Medios del siglo XVI.  
Fuente: Modificado de Rojas y Sánchez, 1985.

Hernandez (1987), señala que en época mas reciente, el grupo étnico que mejor conocía las características de los tepetates era el de los Tlaxcaltecas, quienes desde hace más de cien años lo usaban con fines agrícolas, fracturándolos y agregándoles estiércol, además de hacer sobre ellos obras para el manejo y conducción del agua en áreas habilitadas para el riego.

Williams (1992), tepetate, un término popular mexicano del **Náhuatl Tepetlatl**, tiene un amplio rango semántico en el uso popular y técnico. Análisis de documentos sugiere que en la clasificación **Náhuatl** de materiales terrestres del siglo XVI, el tepetate fue una clase deductiva definida por una consistencia algo friable y pertenecía a una clase superordenada de materiales "parecidos a piedra" y al mismo tiempo fue una categoría inductiva configuracional incluida en la clase superordenada de "tierra de labor".

Williams *op cit.*, analizando los códices Florentino, (escrito por Bernardino de Sagún) Santa María Asunción y el código de Vergara. indica como las tribus **Náhuatlacas** contaban con la presencia de una Taxonomía formal de tres o cuatro niveles, las cuales estaban con figuras por categorías definidas en parte por la textura y color (Figura 5).

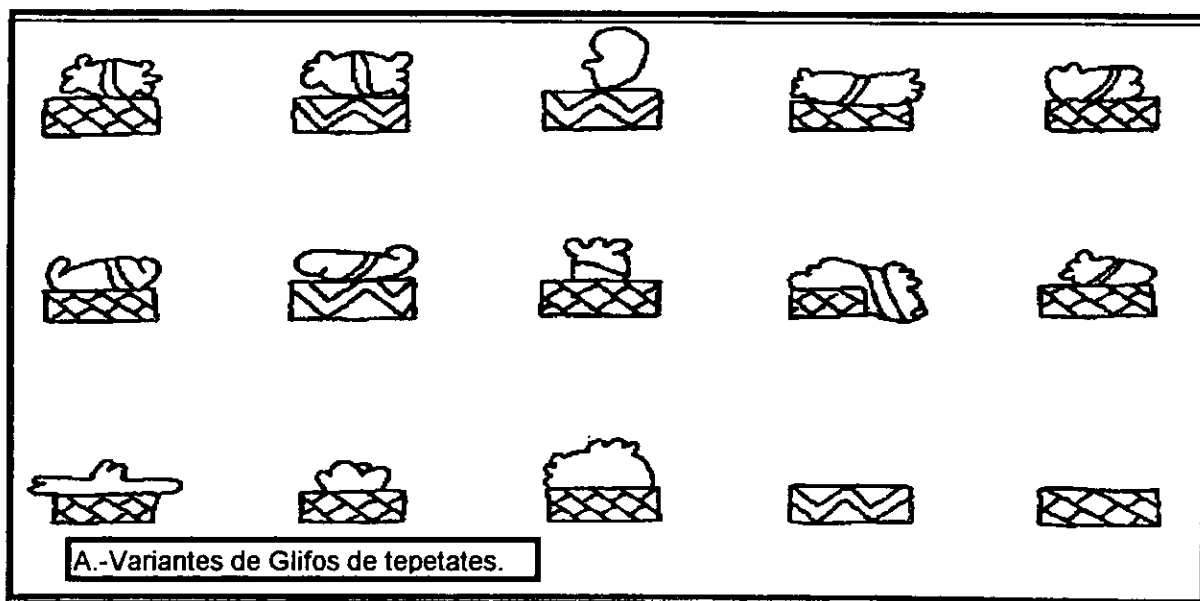
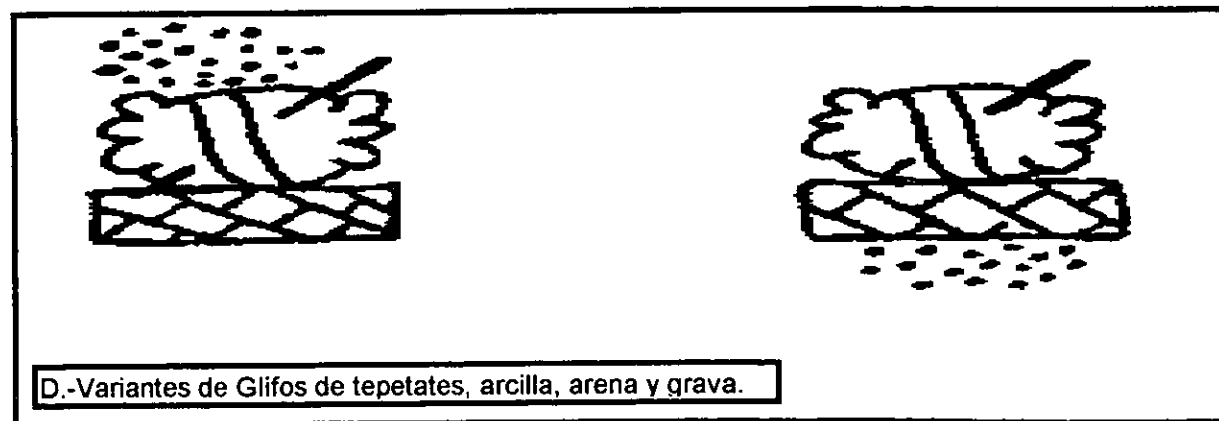
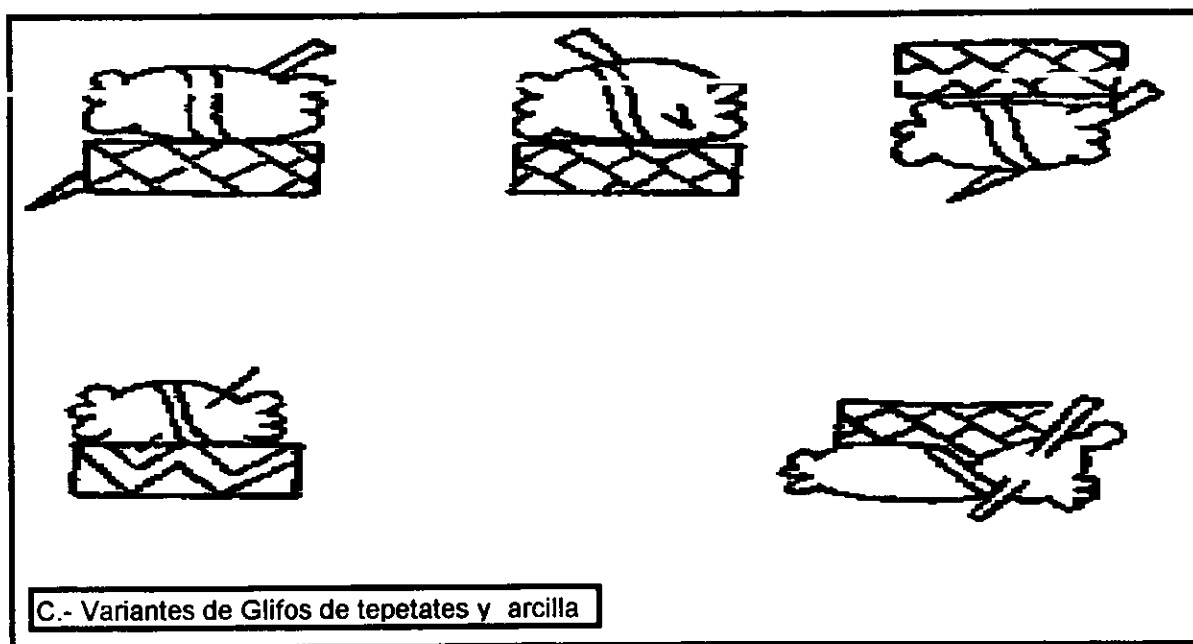
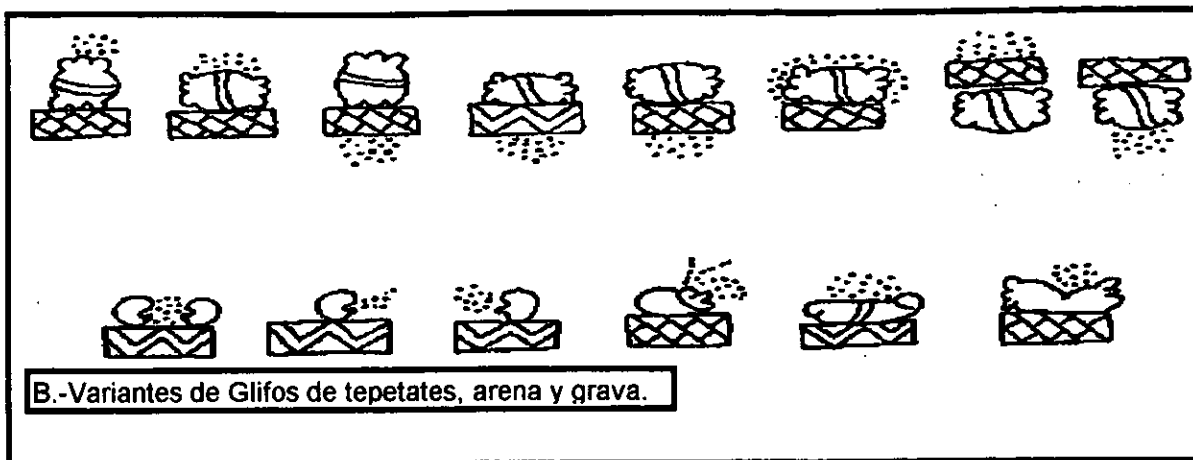


Figura 5. Glifos sobre tepetates. Códices Florentino, Santa María Asunción y Vergara.



Actualmente los campesinos Mexicanos utilizan el término para referirse a las capas gruesas que han quedado expuestas y que son duras cuando están húmedas y extremadamente duras cuando secas.

En nuestro país desde la década de los sesenta, se han realizados estudios sobre tepetates, sobre todo a lo que se refiere a la **cartografía** (Aguilera, 1969; Williams, 1972; Pacheco, 1979; Cervantes, 1983; Rossignol y Campos, 1987; Nimlos, 1989; Guerrero *et al.*, 1992; Flores *et al.*, 1992), en **Morfología** ( Valdez 1970; Flach *et al.*, 1992; Hessmann, 1992; Hidalgo *et al.*, 1992 y 1995; Peña y Zabrowski, 1992 y Flores *et al.*, 1992). en **efecto de la erosión del suelo** (Trueba, 1980; Rey, 1987; Arias *et al.*, 1992; Baumann, *et al.*, 1992; Pratt *et al.*, 1992), **incorporación de los tepetates al proceso productivo** (García, 1961; Avila, 1963; Camargo y Guido, 1987; Arias, 1992; Marquez *et al.*, 1992; Nava *et al.*, 1992; Navarro, 1992 y 1997a y b; Velázquez, 1994 y 1997; Etchevers *et al.*, 1997; Acevedo, 1997 y Adame, 1997 ). Dada la importancia que revisten el conocimiento de los suelos con tepetates, sobre todo en la parte central del país, en 1986 se realizo el Primer Simposio Nacional sobre el Manejo de Tepetates para el Desarrollo Rural en Tlaxcala, Tlax. y en 1991 se realizó el Primer Simposio Internacional sobre Suelos Volcánicos Endurecidos en Montecillo, Edo. de México.

El conocimiento sobre los tepetates, no es exclusivo para nuestro país, de tal manera que se tiene estudios realizados de ellos en varias parte del mundo. En diciembre de 1996, en Quito, Ecuador, se llevo a cabo el III Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Y en 1997 se realizo el seminario sobre suelos volcánicos endurecidos, problematica de un ordenamiento sostenible por el Colegio de Postgraduados y ORSTOM, en Montecillo, estado de Mexico. En los cuatro eventos se abordaron temas relacionados con las capas endurecidas de diferentes países, desarrollandose la temática por científicos Nacionales del país sede y por extranjeros.

## 2.4. Clases de tepetates o capas endurecidas.

Flach *et al.*, (1969) y Flores *et al.*, (1991), expresa que la determinación edáfica para designarlos dentro de una clasificación, varía en función de los tipos de cementantes que presentan y del nivel de compactación:

- .-Cuando la cementación es por sílice,  $\text{SiO}_2$ , reciben el nombre de **duripanes** (Soil Survey Staff, 1960 y 1967); también se les llama **silcretas** (Laumplugh, 1907), o bien **duricostras** (Woolnough, 1927 ) y "**grey billy**" (Winters 1938), existe una fuerte cementación por sílice, estos tepetates son de colores claros; blancos o grises muy claros, pero llegan a presentar con menor frecuencia colores rojizos y amarillentos.
- .-Cuando los cementantes predominantemente son carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), son denominados **petrocálcicos** y son de coloraciones blancas.
- .-O bien calcio, pero en forma de sulfato de calcio, ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), originan los denominados **petrogípsicos** (Soil Survey Staff, 1967 ); el color predominante es el blanco.
- .-Los cementantes pueden ser también sequeóxidos, de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y formar **lateritas** (Buchanan, 1807); recientemente este nombre fue cambiado por **plintita** (Soil Suvey Staff, 1960 y 1967), y actualmente **petroplintitas** (Soil Taxonomy, 1990); en estos materiales la coloración varia de amarillo muy claro hasta rojo intenso.
- .-Cuando existe compactación fuerte y cementación escasa o nula se llaman **fragipanes** (Carlisle *et al.*, 1957, Yassoglou *et al.*, 1960, Grossman y Carlisle, 1969; Guerrero *et al.*, 1992; Soil Survey Staff, 1994; Flores *et al.*, 1990; 1991; 1992; 1995 y 1996).

### **2.5. Distribución de tepetates (capas endurecidas).**

Grossman y Carlisle (1969), en su estudio sobre fragipanes, afirman que éstos, se desarrollan en zonas de clima cálido o templado, restringidos a áreas donde la precipitación es mayor a la evapotranspiración, en alguna época del año, suficiente para provocar un lavado de bases por drenaje interno. Se encuentran en Espodosoles, Inceptisoles, Alfisoles y Ultisoles .

Un fragipán, es un horizonte compactado, de textura de migajón; alta densidad aparente y muy bajo contenido de materia orgánica; es duro a muy duro cuando seco y frágil cuando está húmedo; posee una conductividad hidráulica de baja a muy baja; tiene una proporción alta de limo y arena muy fina y de moderada a baja de arcilla; tiene una expresión estructural pedológica débil y pocas o ninguna raíces, (Grossman y Carlisle *op cit.*).

Flach *et al.*, (1969), considera que los petrocálcicos y petrogípsicos se presentan en suelos de zonas áridas, semiáridas, subhúmedas y húmedas. La cementación por sequioxidos ocurren en áreas húmedas o lo que fueron alguna vez.

Nimlos (1987a y b ), señala que las costras sílico-cementadas probablemente son los tipos de endurecimiento más común en los suelos derivados de cenizas volcánicas.

Nimlos (1989), indica que la extensión de los tepetates Mexicanos nunca ha sido determinada, sin embargo puede ser estimada de las fases duras sobre los trabajos realizados por el servicio de suelos de la Secretaria de Programación y Presupuesto. Para la elaboración de ese mapa, los tepetates fueron considerados como duripanes y mapeados como fase dúrica. Los mapas indican que hay mas de 100,000 km<sup>2</sup> de tierra con tepetates.

Flores *et al.*, (1991), afirman que la afloración de las capas endurecidas o tepetates, están muy relacionada con el clima, estudios recientes en la República Mexicana basados en el análisis de la cartografía temática generada por S.P.P. (1981), se estima que un 30% del territorio Nacional tienen presencia de capas endurecidas, sin considerar las áreas con plintita.

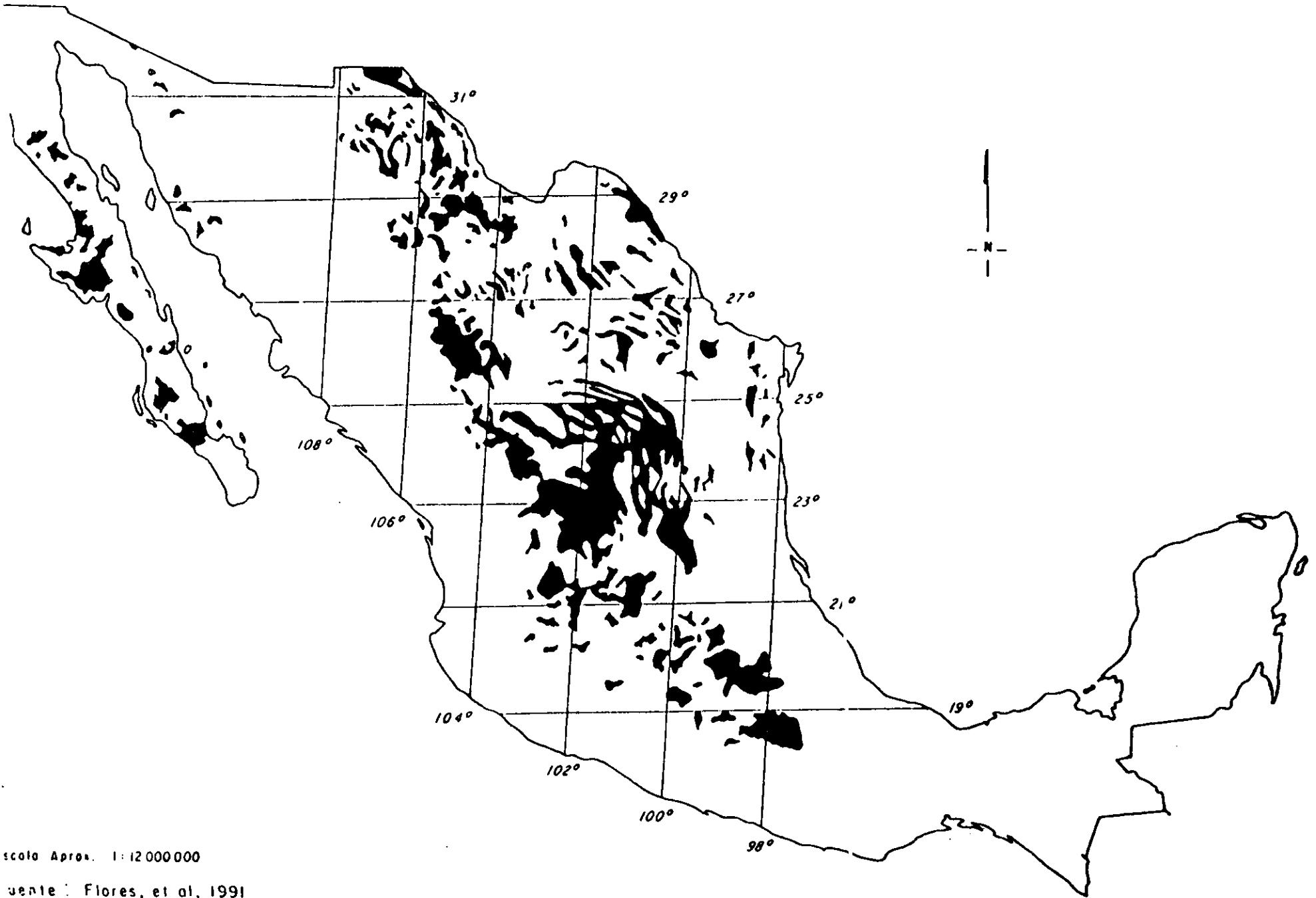
De tal manera que se pueden localizar capas endurecidas en los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Jalisco, San Luis Potosí, Guanajuato, Michoacán, Aguascalientes, Querétaro, estado de México, Hidalgo, Morelos, Puebla, Guerrero, Veracruz y Tlaxcala y indican que los tepetates en México, subyacen generalmente en suelos con horizontes argílicos, en los que se encuentran dispuestos en el perfil en forma de estratos de 30 a 60 cm. o más de espesor y de 20 a 70 cm. de la superficie.

Respecto a la presencia de estos materiales en México, (figura 7) se presenta un mapa con la distribución de tepetates realizado por Flores *op cit.*, exceptuando las áreas de plintitas en el territorio Nacional. Se observa que la mayor parte de este material están ubicados dentro de las dos grandes sierras que conforman nuestra República. Debido a las características de aridez que prevalecen en la Altiplanicie, los tepetates que predominan en México son los petrocálcicos, petrogípsicos y duripanes.

Guerrero *et al.*, (1992), en su trabajo sobre la distribución de tepetates en la República Mexicana, señalan que se trabajo con cartografía de 1: 250,000 y 1:50, 000 generada por el Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI), principalmente de la carta edafológica, con el objetivo de cartografía a escala 1: 4'000,000, la distribución geográfica en la República Mexicana, la escasa información disponible sobre los diferentes materiales



Figura 7 DISTRIBUCION DE TEPETATES EN LA REPUBLICA MEXICANA



escala Aprox. 1:12000000

fuente: Flores, et al, 1991

pedológicos cementados y describir las características ambientales sobre los cuales se han formado. Sobre los mapas de INEGI se delimitaron las **unidades cartográficas cementadas de profundidades de 0-100 cm**, las cuales fueron transferidas a un mapa topográfico y se calculó el área. Los tres tipos de horizontes endurecidos identificados fueron: petrocálcico, duripán y petrogípsicos. En el cuadro 2, se pueden observar las cifras de las siguientes capas cementadas.

Cuadro 2. Extensión superficial ocupada por cada una de las capas endurecidas.

| Tepetate     | Km <sup>2</sup> | Hectáreas   | Por ciento |
|--------------|-----------------|-------------|------------|
| Petrocálcico | 139,518         | 13' 951,800 | 9.38       |
| Duripán      | 37,247          | 3' 724,700  | 1.90       |
| Petrogípsico | 6,920           | 692,000     | 0.35       |
| totales      | 183,685         | 18' 368,500 | 11.63      |

Fuente: Guerrero *et al.*, 1992.

Guerrero *op cit.*, al igual que Flores *op cit.*, puntualiza que petrocálcicos y petrogípsicos se localizan en los estados del norte y centro del país, donde las condiciones de aridez es predominante y existe una deficiencia de humedad durante gran parte de la mayoría del año, de tal manera que se pueden localizar en los estados de Coahuila, Durango, San Luis Potosí y Nuevo León. La gente del campo utiliza el termino de "caliche" para hacer referencia a este tipo de capas cementadas. Los Duripanes se manifiestan en áreas de influencia volcánica, con alto contenido de sílice, se pueden localizar principalmente en la zona denominada como Eje Neovolcanico Trasmexicano; Tlaxcala, Hidalgo, Querétaro Puebla y Jalisco, también algunos estados adyacentes a la franja volcánica como Aguascalientes y San Luis Potosí.

Zebrowski *et al.*, (1992), señalan que la cantidad de capas endurecidas en el Eje Neovolcánico son tepetates que ocupan una extensión de aproximadamente

30,700 Km<sup>2</sup> que significan el 27% de la superficie total del Eje Neovolcánico. Además señalan, que la relación entre el clima y la distribución de los tepetates, es muy estrecha. Además señala, que los tepetates aparecen en el altiplano mexicano únicamente bajo una pluviometría total anual menor a 800-900 mm. Los tepetates ricos en carbonatos de calcio se localizan en zonas con precipitación inferiores a 650-700 mm. (Zebrowski *op cit.*).

Dubroeuq *et al.*, (1992), afirman que existe relación entre los regímenes hídricos - térmicos y tepetates, en sus estudios realizados en el Valle de México, señalan que tepetates con cementantes de sílice, se localizan al empezar la zona climática subárida, abajo de la zona húmeda con Andosoles.

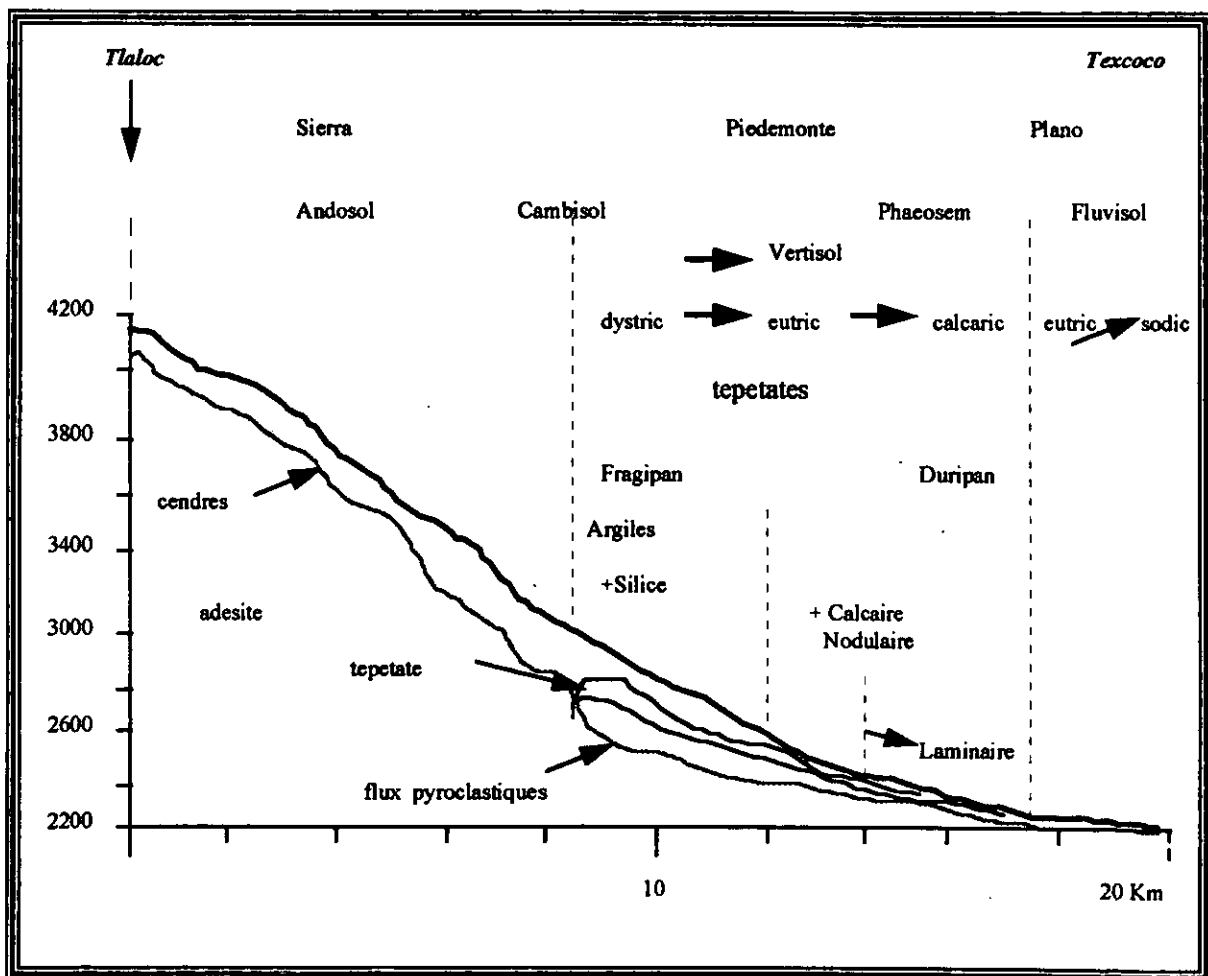


Figura 6. Climatoposécuencia de suelos con tepetates en Texcoco, Edo. de México. Fuente: Quantin, 1992.

En la figura 6, se puede apreciar una climotoposecuencia de suelos con tepetates en Texcoco, Edo. México, presentada por Quantin (1992), donde señala que en suelos de altitudes de 2500 a 2800 m.s.n.m. en climas subhúmedos, el suelo derivados de cenizas riolíticas, presenta horizontes endurecidos de consistencia de fragipán. Es seguro que el material original proviene de proyecciones de cenizas finas, las rocas madres son ricas en sílice, el mayor problema es saber si la consolidación es de origen pedológico o geológico.

Flach *op cit.*, Flores *op cit.*, y Guerrero *op cit.*, aclaran que los duripanes se encuentran en climas semiáridos y templados, también en las zonas áridas y semiáridas donde la precipitación es suficiente para disolver los productos del interperismo en el perfil, pero donde no ocurre mucha lixiviación, se les encuentra en suelos de origen volcánico. Típicamente subyacen en suelos con horizonte argílico o nátrico. En ocasiones también se presentan en vertisoles. Los duripanes típicos tienen de 50 cm a varios metros de espesor; estructura masiva, laminar o prismática y son de color blanco, gris, rojizo o amarillo.

Tabla 1. Algunas denominaciones de las capas endurecidas en algunos países.

| PAÍS                              | PAÍS                                 | TERMINO  |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Geólogos                          | Internacionalmente                   | Toba volcánica.  |
| México                            | Etnia<br>Náhuatl<br>Otomí<br>Tarasco | Tepetate.<br>Xiro.<br>Shere.   |
| Nicaragua<br>Antillas<br>Colombia |                                      | Talpetate.<br>Pán.<br>Duripán(antes Hardpan) y<br>Cangahua.              |
| Ecuador<br>Perú<br>Chile          |                                      | Cangahua.<br>Hardpan.<br>Cangahua, Moromoro, Tosca,<br>Fierrillo, Ñadis. |
| Japón<br>Australia<br>E. U. A.    |                                      | Kora, Masa<br>Grey Billy<br>Duripan, Fragipan                            |

Fuente: Modificado por Nimlos, 1987.

Zebrowski *op cit.*, dice que en la mayoría de los países del arco volcánico centro y suramericano, los suelos volcánicos que presentan en sus perfiles horizontes endurecidos han sido designados con nombres vernáculos. Las capas endurecidas conocidas como tepetates en nuestro país, las podemos encontrar en otros países con diferentes nombres, incluso con diferentes denominaciones dentro de un mismo país, como es nuestro caso, el de estados Unidos de Norte América, Chile y Colombia. En la tabla 1, podemos observar los diversos nombres que se asignan a las capas endurecidas de los suelos derivados de cenizas volcánicas.

Báez *et al.*, 1995, señalan que la superficie con capas endurecidas en México (tepetates), cubre de 31,000 a 170,000 Km<sup>2</sup> y que los tepetates que afloran representan la mitad de esta superficie.

### **2.6. Formación de las capas endurecidas.**

Dentro de los estudios realizados Nimlos *et al.*, (1987a, 1989 y 1990); Flores *et al.*, (1990,1991,1992,1995, y 1996), establecen que es muy difícil definir la génesis de las capas endurecidas, pues estas pueden ser originadas por efectos diagenéticos o edáficos. Actualmente se identifican tres procesos para explicar los endurecimiento que sufren los suelos:

- La consolidación de las partículas minerales que provoca una compactación, donde además, puede existir cierta cementación.
- Soldadura de los materiales de origen piroclásticos. ( origen ígneo ) Nimlos, (1987a, 1989 y 1990).
- Los proceso pedológicos (sedimentarios) donde existe un aporte de cementantes en la solución del suelo (Cline, 1952, Yassoglou *et al.*, 1960, Nimlos 1987a, 1989 y 1990; Dubroeuq *et al.*, 1989; Zebrowski, 1992; Flores *et al.*, 1990,1991,1992, 1995 y 1996 ).

Con base en los procesos señalados, cada tipo de capa endurecida presenta sus características muy específicas.

Gile *et al.*, (1965), resume la evidencia del ópalo igual que compuestos de sílice, carbonatos de calcio y sequioxidos con o sin materia orgánica son responsables para la formación de los horizontes cementados del suelo. Hay buenas evidencias de que la sílice o  $\text{Si(OH)}_4$  interactúa con la superficie de los minerales arcillosos, la sílice amorfa y el pH del suelo tienen cargas negativas que incrementa la probabilidad de la tendencia de los geles de sílice a la polimeración. El carbonato de calcio es menos cementante que la sílice.

Nettleton *et al.*, (1968), menciona que la presencia de populos, también como paquetes de altas densidades indican el derrumbe de la matriz del suelo causada por las altas densidades aparentes del horizonte fragipán. La relativa baja cantidad de arcilla en el horizonte fragipán es el resultado de una gran susceptibilidad a la traslocación de arcilla y posible destrucción durante la reducción y remoción del hierro. La traslocación de esta arcilla es confirmada por el incremento de marcas de cuerpos de arcilla iluvial, cutanes primarios de iluviación y granos argílanos en el horizonte B2t bajo el fragipán.

Grossman y Carlisle, (1969), en su estudio sobre fragipanes, afirman que estos, se desarrollan en zonas de clima cálido o templado, restringidos a áreas donde la precipitación es mayor a la evapotranspiración, en alguna época del año, suficiente para provocar un lavado de bases por drenaje interno. Se encuentran en Espodosoles, Inceptisoles, Alfisoles y Ultisoles.

Flach y colaboradores, (1969), opinan que los duripanes se derivan del prolongado intemperismo de los feldespatos y minerales ferromagnesianos, o bien, del rápido intemperismo del vidrio volcánico y materiales amorfos. Los piroclastos liberan fácilmente la sílice en agua, permitiendo su desplazamiento y

acumulación en otras partes del perfil. Los tepetates petrocálcicos se forman por precipitación y acumulación de carbonatos, cuyas fuentes principales son: rocas carbonatadas en materiales parentales, ceniza calcárea y carbonatos autigénicos. Estos tepetates son predominantemente de color blanco.

Acevedo y Flores (1997) señalan que también se presentan de origen ígneo y que el color blanco se debe al poco grado de alteración de los minerales.

Karathanasis (1987), señala que la precipitación de los aluminosilicatos amorfos son considerados producto intemperizado de la reacción de la disolución de los feldespatos (principalmente albita). La composición, solubilidad y rigidez de los aluminosilicatos amorfos precipitados se ha creído ser controlados por las condiciones de drenaje interno-externo y las fluctaciones del p.H., además de ser agentes cementantes en los suelos con horizonte fragipán.

Nimlos (1987a), además, considera que, como el proceso pedogénico siempre se presenta sobre una consolidación geológica, es muy difícil diferenciar si no se presenta una capa de sílice iluvial. Durante el proceso pedogénico, existe eluviación de la sílice en un horizonte superior e iluviación en un horizonte inferior, provocando cementación en este último. La existencia de capas endurecidas a una mayor profundidad implica que el transporte de la sílice no pudo efectuarse por el proceso pedogenético, por lo que se deduce que este fue originado por proceso geológico, aun cuando posteriormente existió procesos pedogénicos.

En la consolidación geológica, Nimlos (1989), señala que es función directa de la temperatura de los fluidos volcánicos y la compactación durante la depositación de los materiales; de tal forma que, con un máximo de temperatura del fluido, al presentarse una compactación fuerte, los minerales silícicos se fusionan y forman las tobas.

En algunos casos, la formación de capas cementadas por sílice es pedogénica, se produce por eluviación de la sílice en horizontes superiores e iluviación en el interior, de manera que este último se cementa. Sin embargo, en el proceso de formación de los tepetates cementados por sílice, el vulcanismo ha sido un factor decisivo. Durante el Cuaternario hubo dos tipos de erupciones, uno consistió en un flujo suave de lava y el otro, en la expulsión violenta de gas, ceniza candente y vapor de agua; fenómenos que dieron lugar a la formación con características muy diferentes.

Nimlos y Ortiz, (1987b), y Nimlos y Hillery, (1990), afirman que otra manera de formación de las costras sílico-cementadas es a través de flujos de cenizas que son erupciones que provocan fuertes emisiones de piroclastos que tienden a ser acompañados por expulsión de grandes cantidades de vapor de agua. Este vapor se condensa y ocasiona fuertes aguaceros, por lo que los depósitos cineríticos se saturan con agua y fluyen hacia las partes bajas a veces corriendo distancias considerables. Es evidente que en condiciones de saturación exista una liberación de la sílice que cementa la masa entera de ceniza, esto sucede debido a que en la ceniza volcánica el enfriamiento del material es tan rápido que no permite la cristalización de la sílice quedando como material amorfo altamente soluble. Cuando es liberado a la solución del suelo, puede moverse, depositándose en otras partes del perfil del suelo originando cementación, dando la formación de un mineral endurecido muy semejante a las costras pedogenéticas.

Flores *et al.*, (1991), analiza que su génesis es aún difícil de establecer en la mayoría de ellos, ya que pueden originarse a través de procesos puramente diagenéticos o pedogenéticos o por la acción de ambos procesos. El USDA afirma que el tepetate involucra diversos materiales tanto de origen geológico como edafogénico, caracterizados por presentar diferentes grados de



compactación o cementación secundaria. Estos materiales generalmente subyacen al suelo, cuando llegan aflorar siempre son índice de problemas severos de erosión (LLerena *et al.*, 1992).

Guajardo, V.R. citado por Flores *et al.*, (1991), en los petrogípsicos, la cementación se lleva a cabo por cristalización del sulfato de calcio cuando se llega al nivel de hidratación óptimo. Su color al igual que el de los petrocálcicos, es blanco. Flores *op.cit.*, afirma que la cementación por sesquióxidos involucra diferentes clases de cementación, de las que destacan la formación de plintita, misma que se da bajo la influencia de una lámina de agua fluctuante. Dicha lámina crea condiciones alternadas de oxidación y reducción. Su coloración varía de amarillo muy claro hasta rojo intenso.

Miehlich (1992), plantea que los tepetates se forman a partir de los antiguos depósitos de cenizas volcánicas; durante el interperismo liberan aproximadamente tres veces más de sílice que aluminio. Solo una parte de la sílice se incorpora a los minerales de arcilla. Debido a la baja lixiviación que se presenta en el suelo bajo un clima ústico-isomésico muchos de los excedentes de sílice se concentran formando opalo-A y arcilla en los horizontes superficiales. Estos están empaquetados debidamente y son blandos a firmes. Después que se pierde el suelo superior cuando es erodable y el subhorizonte subyacente queda expuesto a variaciones por humedecimiento y secado, ocasiona fuerte compactación y endurecimiento de las arcillas ricas en opalo-A, las cuales forman el tepetate.

Hessmann (1992), señala que hay varios factores que indican que el endurecimiento se debe a fenómenos secundarios, los cuales se conducen a una cementación o impregnación. Las investigaciones micromorfológicas muestran que una fuerte consolidación es causada por la formación de nuevas arcillas, la

cual es responsable de la cementación de las partículas de los sedimentos incluyendo a los agregados.

Esta consolidación puede ser reforzada por la impregnación de compuestos de hierro que da al material las coloraciones amarillentas, parduzca o rojizas. Un importante paso para el endurecimiento es el cubrimiento de los poros gruesos, excepcionalmente de los canales de las raíces, por arcillas eluviadas. Debido al aumento del espesor de los revestimientos arcillosos en los horizontes de "tepetate", el endurecimiento crece.

### **2.6.1. Características Físicas, Químicas, Mineralógicas y Microbianas.**

#### **2.6.1. 1. Físicas.**

Con respecto a las características físicas de los tepetates varían entre los colores gris claros o amarillo claro o castaño, y en húmedo son tendientes a los colores gris a rojo amarillento. Carlisle *et al.*, (1957), señala que los fragipanes varían de acuerdo a la textura y su drenaje natural (Figura 8).

Granulométricamente se estima que el mayor porcentaje del total de las partículas corresponden a la fracción de arena variando aproximadamente de un 50 a 60%, con respecto al limo total cubren un intervalo que va de 30-40% y en la fracción de arcilla total cubre un intervalos de aproximadamente de un 12-40% (Valdez, 1970, Pacheco y Estrada, 1987; Flores *et al.*, 1991 y Marañón, 1994). Valdez *op cit.*, todos los tepetates de su estudio fueron de textura arenosa con colores predominantes claros.

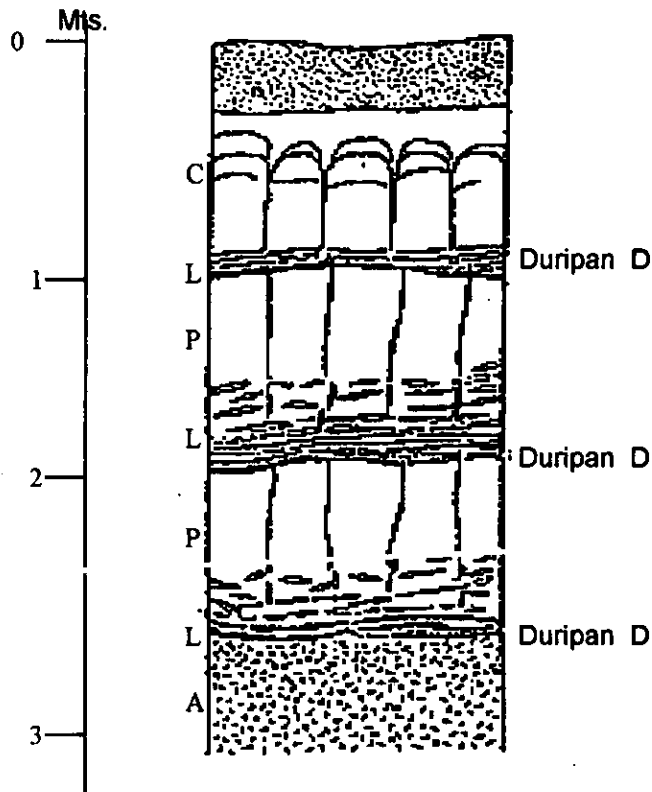


Figura 8. Corte esquemático del suelo con tepetate.

Nota: C=Horizonte columnar, P=Horizonte prismático, L=Horizonte laminar con aspecto de plintita, D=Duripán, A=Horizonte de la roca adesítica.

Fuente: Dubroeuq, 1992.

Prasad *et al.*, (1975), concluyeron que el bien expresado fragipán, tiene altas densidades aparentes, menor espacio poroso, pequeños poros, menos agua aprovechable y bajos valores de conductividad hidráulica.

La conductividad hidráulica generalmente es baja en las capas endurecidas, Dabney y Selim (1987), en trabajo con núcleos no alterados, obtenidos de horizontes superficiales y subhorizontes de suelos de oliver en la dirección vertical y horizontal, encontraron que la conductividad hidráulica no tuvo variación significativa en los horizontes superiores en ambas direcciones. Pero en el fragipán, la dirección del flujo vertical fue tres veces mayor que en la dirección

horizontal, atribuyendo el comportamiento, a la orientación vertical de las zonas restrictivas de la circulación dentro del fragipán.

Con respecto a su clasificación textural son generalmente franco arenosos, franco arcillosos, francos y en algunos casos francos arcillo-limosos (Sánchez *et al.*, 1987 y Flores *et al.*, 1991).

Nimlos (1989), en 18 muestras estudiadas de tepetates, encontró que la densidad aparente varía de 1.00 a 2.11 g/cm<sup>3</sup> y la media fue de 1.38 g/cm<sup>3</sup>. La densidad aparente varía entre los valores 1.1 a 1.9 g/cm<sup>3</sup>, la densidad real entre 2.0 y 2.8 g/cm<sup>3</sup> (Flores *et al.*, 1991 y Etchevers *et al.*, 1992.).

Los poros pueden estar interconectados, es decir, no continuos. Grossman y Carlisle, (1969), indican que la estructura de los fragipanes puede estar influenciada por el material parental. Olson (1985), señala que los resultados de porosidad demostraron que la capa endurecida de fragipán contiene significativamente menos porosidad de 0.17 a 200 μm, poros de almacenamiento de agua (50 a 0.5 μm) y poros entre 10 y 200 μm que los horizontes adyacentes dentro del perfil del suelo. La porosidad total varía entre 13 a 47% (Flores *et al.*, 1991).

Nimlos *op cit.*, señala que la resistencia a la compresión simple fue en promedio de 25 kg/cm<sup>2</sup> pero ésta varió desde 3 a 160 kg/cm<sup>2</sup>. Nimlos *op cit.*, y Miehlich, (1992), señalan que existe diferenciación entre la dureza de los diferentes tepetates de colores blanco, amarillo y rojo. Peña *et al.*, (1992), concluyeron, que con base en pruebas de solubilidad, los tepetates con mucho carbonato de calcio presentaron mayor resistencia, siguiéndoles con los de poco contenido de carbonato, las resistencias más bajas fueron presentadas por los tepetates sin carbonatos.

La pendiente de los suelos juegan un papel importante en el desarrollo de los tipos de tepetates a formarse.

#### **2.6.1.2. Química.**

Las características químicas de los tepetates varían en términos estrechos de acuerdo a su composición (Sánchez *et al.*, 1987, Flores *et al.*, 1991). Los porcentajes de materia orgánica son muy bajos cubren un intervalo de 0.1 a 0.8.

En la reacción del suelo (pH) los valores que se presentan de moderadamente ácidos a ligeramente alcalinos (5 a 7.1). El porcentaje de nitrógeno total es bajo y varía de 0.004 a 0.09 (Sánchez *et al.*, 1987 y Flores *et al.*, 1992). Los cationes intercambiables son muy variables, el calcio cubre intervalos de 5.0 a 19.0 meq/100 g, el magnesio de 4.0 a 11.0 meq/100 g, el sodio de 0.30 a 1.70 y para el potasio los valores fluctúan entre 0.20 a 1.80 meq/100g (Flores, *et al.*, 1992). La capacidad de intercambio catiónico total generalmente es alta y cubre un intervalo de 17.5 a 35 meq/100g (Sánchez *et al.*, 1987 y Flores *et al.*, 1992).

Etchevers *et al.*, (1992), expresa que el conocimiento de las características químicas de los suelos es fundamental para el entendimiento de su génesis y el diseño de sus prácticas adecuadas. Al analizar 15 muestras de tepetates, todos los tepetates presentaron  $\text{CaCO}_3$ , ya sea uniformemente distribuido en la masa o en forma laminar que vario de 1.4 a 14.2%, lo cual se atribuye a la naturaleza del material parental y las condiciones del clima en que se desarrollan. El pH fue alcalino, bajos contenidos de C, N, P. La C.I.C. varió de 19.6 a 32.0 meq / 100 g de suelos. El porcentaje de saturación de bases es elevado.

### 2.6.1. 3. Mineralógicas.

En estudios mineralógico realizado por Vallejo y Aguilera(1969) y Rey (1979), se reportan contenidos de los siguientes minerales: cuarzo, feldespatos, ortoclasa, alteradas y como cementante está el  $\text{CaCO}_3$ ; clasificado como toba adesítica alterada. En análisis de rayos X se reportan la presencia de cuarzos, feldespatos, cristobalita, illita y material amorfo.

Los tepetates estan constituidos por minerales primarios, en su mayoría de un mismo origen aunque existen algunos que presentan adiciones secundarias. Los minerales más abundantes son: cuarzo, feldespatos, piroxenos, anfíboles, plagioclasas, cristobalitas, hornablendas, lo cual indica la presencia de silicatos, aluminios y sílice amorfa como agentes cementantes (Valdéz, 1970 y Trueba, 1979). Blank *et al.*, (1990), encontró dentro de su trabajo realizado en suelos con duripan las siguientes mineralogía de arcillas, sepiolite, opal-A, smectita, y también cuarzo. Acevedo y Flores 1997, identificaron haloisita.

Hidalgo *et al.*, (1992), indica que los principales minerales primarios residuales alterados, observados en láminas delgadas de tepetates son: vidrios riolíticos, plagioclasas, hornoblenda y magnetita ademas de un poco de hiperstena y augita y pequeñas cantidades de cuarzo y cristobalita.

Miehlich (1992), encontró que los tepetates contenían alofano, imogolita, opalo-A, óxidos de amorfos de aluminio y hierro y manganeso, haloisita, gibsita.

Hidalgo (1995), concluye que los minerales arcillosos interestratificados 1:1\2:1 de la fracción fina ( $<0.5\mu$ ) de los tepetates se presentan estructurados en laminas u hojuelas orientadas, lo cual implica un arreglo "cara a cara" de las arcillas y por lo tanto una fuerte cohesión de la matriz del tepetate. Esta cohesión es mas fuerte en caso de que las arcillas esten deshidratadas(sin capas de agua interlaminar).

#### 2.6.1. 4. Microbianas.

Ferrera (1992), estima que los microorganismos en los agroecosistemas tienen un papel fundamental en la nutrición de las plantas debido a sus múltiples actividades metabólicas, como son; la fijación del CO<sub>2</sub>, biotransformación de la materia orgánica y síntesis de humus. La mayoría de estos eventos se llevan a cabo en la rizósfera, sitio de interacción de los microorganismos con las raíces.

En los suelos perturbados esta dinámica se ha alterado en forma dramática hasta dar como resultado suelos marginados, tales como los suelos con tepetates que por su infertilidad y difícil manejo, requieren diferentes estrategias para incorporarlos al proceso productivo. Un indicador de la actividad de los microorganismos del suelo o de la rizósfera se mide por el consumo de oxígeno, la evolución del CO<sub>2</sub> o la evaluación de otros productos del metabolismo.

Matías *et al.*, (1992), en estudios sobre tepetates carbonatados procedentes de la parte Oriente del valle de México, demostraron que el biofertilizante *Azolla caroliniana* presenta un efecto favorable en el crecimiento y abastecimiento nutrimental de *Eysenhardtia polystachya* en tepetate. Alvares *et al.*, (1992), en un tepetate sin roturar encontró una escasa comunidad microbiana de bacterias, actinomicetos y hongos, pero esta se incrementó después de haberse roturado el tepetate e incorporación de estiércol de bovino. Se observó también un efecto estimulador de la rizósfera de las plantas cultivadas.

Matías *et al.*, (1995), demuestra la influencia del manejo agroecológico sobre la actividad microbiana en suelos de tepetate. Efectuando trabajos con algunas especies vegetales sometiéndolas a tratamientos de inoculación con *Azospirillum*, *Rhizobium* y Mycorrizas con materia orgánica. El incremento de biomasa por los tratamientos, es el resultado de la actividad de algunos grupos de microbianos en la descomposición y transformación de los nutrimentos, los

cuales aceleran el crecimiento de varios microorganismos que viven en el tepetate

Navarro (1997b), señala que la inoculación biológica no aumentó la producción de los cultivos, sin embargo la inoculación asociada a un fertilizante arrancador *starte* (15-60-0) duplica los rendimientos de maíz obtenidos con inoculación sola.<sup>\_1/</sup>

### **2.7. Incorporación de las capas endurecidas (Tepetates) al proceso productivo**

La población prehispanica, recuperaba los suelos de tepetates pulverizando los fragmentos duros con azadón y reparando los suelos con materia orgánica (Williams, 1972). Bradford *et al.*, (1980), señalaron que la producción de cosechas en un fragipán, se incrementó por la incorporación de limo y aserrín hasta el mezclado del perfil del suelo, el tratamiento con aserrín incrementó la producción de granos hasta en un 225 por ciento.

Originalmente, descansaba sobre el tepetate una capa fértil de suelo, misma que fue eliminada por erosión o a consecuencia del mal manejo de los suelos, tanto agrícolas, pecuarios y forestales. Hernández (1987), menciona que cuando esta capa se pierde, el tepetate aflora y se convierte en un serio problema, los principales dificultades para la integración de los tepetates al proceso productivo son su dureza y su baja disponibilidad de nutrimentos, de manera que el manejo mas adecuado para su incorporación está basado en su fracturación, incorporación de materia orgánica que favorece la formación de agregados y la retención de humedad para la posterior formación de suelo.

<sup>\_1/</sup>. En consulta directa con el Dr. Hermilio Navarro Garza, indico que en este trabajo afecto seriamente un periodo de sequía de tres semanas, que se presento al momento de la siembra, y que no descarta las bondades de los efectos potenciales de los inoculantes en mejores condiciones (25/07/998).



Pimentel (1987), plantea que hasta el momento la técnica mas adecuada que se ha encontrado, ha sido la construcción de terrazas de absorción combinadas con terrazas canal, para permitir una mejor conservación de todo el sistema de terraceo. Los costos son elevados, ciertamente, pero la preparación es muy efectiva. (Figura 9), Otra alternativa es la combinación del sistema de terraceo con subsoleo a nivel, que disminuye los costos considerablemente y se aumenta la velocidad en los trabajos.

Nimlos (1989), afirma que algunas áreas de tepetates han sido recuperadas por riego, terraceo o por excavación. Pero los costos de esos tipos de tratamientos de la tierra son muy costosos.

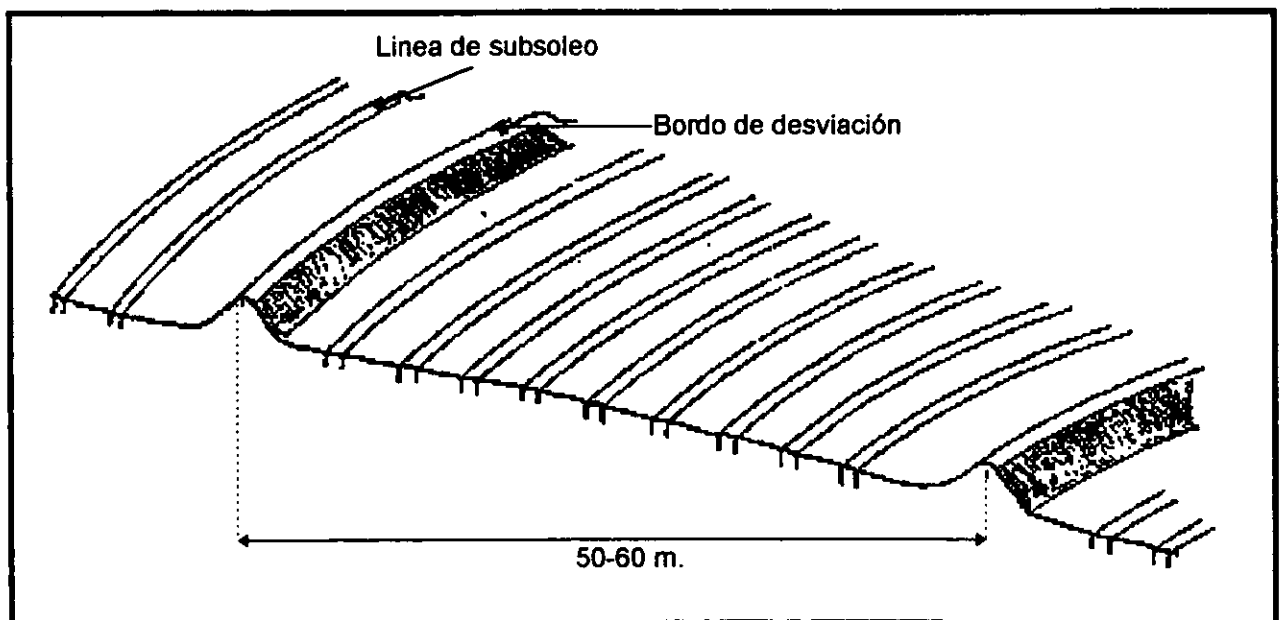


Figura 9. Forma esquemática del subsoleo practicado en la zona de Tequexquináhuac.

Fuente: Pimentel, 1992.

Nimlos (1990), señala que la restauración de los terrenos con tepetates involucra efectuar el quebrado para separar la parte superior del tepetate o hacer terrazas (Figura 10), para retener el agua para que pueda infiltrarse. La dureza del

tepetate y la conductividad hidráulica influye en ambos tratamientos. El tepetate de moderada a alta dureza mostró ser mas fácilmente restaurados durante las estaciones de lluvia, mientras que el tepetate de baja dureza puede restaurarse en cualquier época del año. Es decir, la dureza del tepetate declina con el contenido de humedad. El tepetate tiene baja a muy lenta permeabilidad natural que explica sus fuertes erosiones e inundaciones frecuentes.

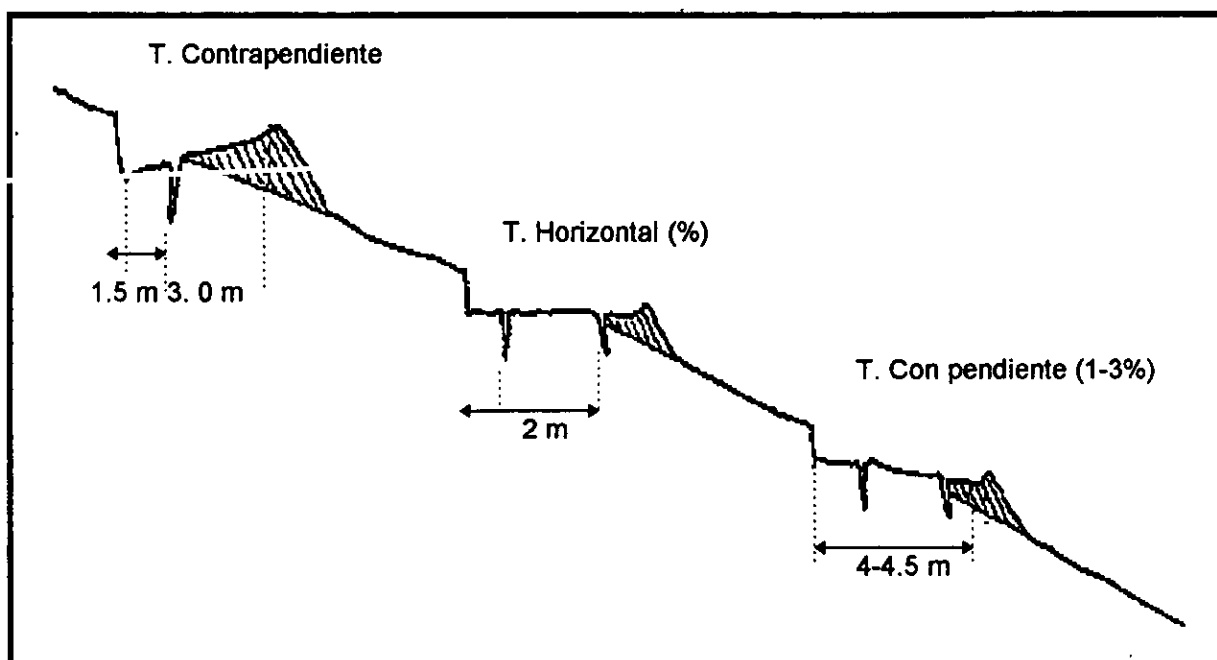


Figura 10. Perfil esquemático de tres Terrazas.

Fuente: Pimentel, 1992.

Arias (1992), afirma que la metodología de rehabilitación de suelos con tepetates, requiere uso de maquinaria pesada, implementos agrícolas, aplicación de fertilizantes (naturales o sintéticos), y prácticas de control de la erosión. Para la recuperación de tepetates es necesario primero fragmentar el material, originalmente, dicho proceso se llevaba a cabo de manera manual, sin embargo, actualmente se puede realizar con maquinaria, con lo que se facilita y agiliza el proceso.

Pimentel (1992), explica: "nuestros antepasados indígenas los hicieron productivos terrazeando los terrenos de ladera (Figura 11), con los que propiciaron la retención de agua". Esta misma técnica se ha empleado en trabajos de corrección de cuencas, pero utilizando maquinaria pesada con potentes subsoladores (hasta 1.2 m.) a fin de facilitar la penetración del agua y el desarrollo radical de los arboles.

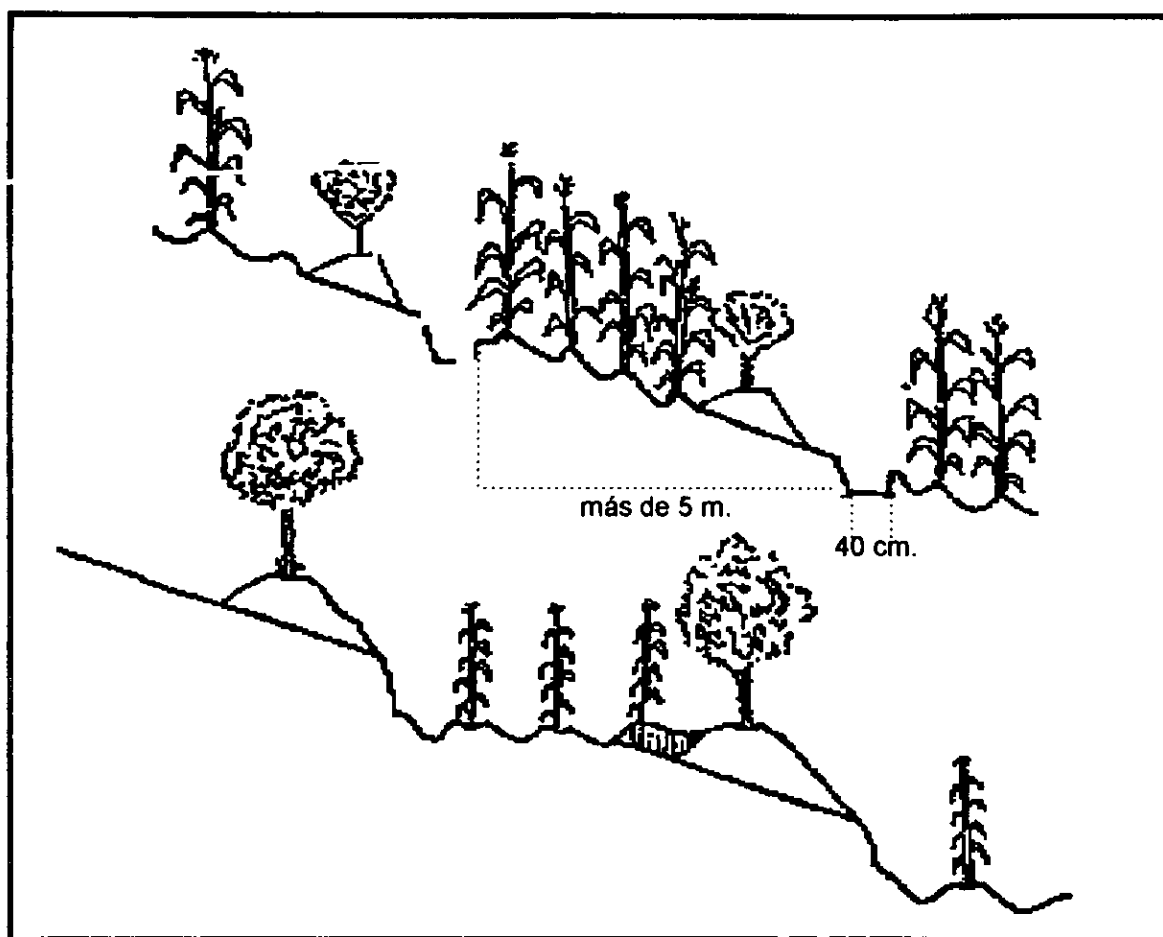


Figura 11. Sistema Nezahualcóyotl.

Fuente: Pimentel, 1992.

La fragmentación del tepetate permite el paso del agua y el aire al subsuelo, el desarrollo de microorganismos y la libre penetración de las raíces, con lo que se favorece la formación de agregados y posteriormente de suelo. Sin embargo, el tamaño de las fracciones debe ser tal, que sean lo suficientemente finas para no

dañar el sistema radical, pero suficientemente gruesas para evitar que las plantas se asfixien ( Zebrowski, 1992). En la literatura, la mayoría de los trabajos recomiendan la trituración del tepetate ( Peña, 1987; Camargo y Guido, 1987; Tovar, 1987; Mofin y Camacho, 1987; Pedraza *et al.*, 1987; Pimentel, 1987 y 1992; Arias, 1992 y Zebrowski, 1992 ).

Etchevers *et al.*, (1992), también afirma: los tepetates presentan un porcentaje de materia orgánica y nitrógeno muy bajo, así como niveles mínimos de fósforo, cobre, zinc y hierro disponibles, debido a la falta de actividades microbianas del tepetate y a las reacciones químicas que los hacen inaprovechables por las plantas. Los elementos esenciales se puede encontrar en cantidades suficientes gracias a la descomposición de materiales ricos en esos elementos. De manera que para la integración de los tepetates al proceso productivo es indispensable la adición de los elementos de que carecen, lo cual se hace mediante la adición de materia orgánica y fertilizantes.

Con la adición de materia orgánica se mejora la estructura de las capas endurecidas y se acelera la formación de suelo, ya que su descomposición da como resultado la síntesis de sustancias orgánicas complejas que ligan a las partículas en agregados. Tales formaciones mantienen un estado granular que permite la circulación de agua y aire. Por otra parte, la materia orgánica aporta los nutrimentos necesarios para el establecimiento de especies vegetales, lo cual también puede favorecerse aplicando algunos fertilizantes (Sánchez, 1991 y Márquez *et al.*, 1992, Acevedo y Flores 1997).

Las especies más usadas para la rehabilitación de capas endurecidas han sido las especies forestales, principalmente por su resistencia y adaptabilidad a condiciones adversas. En algunas zonas, se cultiva maíz, frijol y algunas otras gramíneas y leguminosas con fines de autoconsumo, pero en general no han sido

estudiados los efectos de los cultivos sobre las capas cementadas (Velázquez 1997).

Para la rehabilitación de capas cementadas, después de la fracturación del material y la adición de materia orgánica, la siguiente etapa debe ser formación del suelo, es decir, crear una estructura porosa y ligera capaz de permitir el intercambio gaseoso, el movimiento del agua y la penetración de las raíces. Las partículas asociadas en pequeños paquetes denominados agregados constituyen la estructura más deseable para el desarrollo vegetal y la formación de suelo. Si se favorece la formación de agregados en capas cementadas se puede conseguir las características estructurales deseadas.

Pedraza *et al.*, (1987), encontró que el *Pinus radiata* crecía mejor en tepetates de color gris que incluso mejor que en suelos, mientras la *Casuarina* y el *Eucaliptus* se desarrollaban mejor en el tepetate rojo.

Arias y Figueroa, (1990), encontraron que el *Pinus montezumae* tuvo mayores incrementos medios anuales en altura en tepetates rojos. Las plantas constituyen uno de los principales factores en la formación del suelo. Durante su crecimiento se producen numerosos cambios de la rizósfera a causa de las raíces. Se favorece la disgregación del material y una posterior agregación con diferentes grados de estabilidad. La influencia de las plantas en las características de un suelo se resume en un incremento en el contenido de materia orgánica y la formación de agregados por efecto de la acción mecánica de la raíz y la producción de mucílagos.

González (1981 y 1984) citado por Arias (1992), realizó una evaluación de posibles especies forrajeras que incluyó a 32 gramíneas y 10 leguminosas. Los experimentos fueron realizados en terrazas construidas en tepetates, encontrándose los pastos más adaptables son: Rhodes (*Choris gayana*, Bell),

Kikuyo Whittet (*Pennisetum clandestinum*), Pasto Llorón (*Eragrotis curvula*), Bromo (*Bromus inermis*) y varios Buffel.

Las especies de leguminosas que tuvieron mejores resultados fueron: Trébol Ladino o Blanco (*Trifolium repens*), Trébol alisike (*Trifolium pretense*), Trébol Huban o Dulce (*Melilotus alba annua*) y cuatro variedades de trébol subterráneo.

Llerena (1992), señala, la importancia de contrarrestar esta problemática mediante un manejo integral de cuencas. Así, dentro de este manejo, se debe considerar la cuenca como una unidad ecológica, hidrológica y regional, que debe fungir como el eje ordenador fundamental y como el marco de referencia, a partir del cual se generen las ideas, planes y acciones relacionadas con el aprovechamiento racional de los recursos naturales, en especial el suelo.

Báez *et al.*, (1995), concluyó que en cuanto a los métodos de siembra, son más productivos los sistemas asociados con leguminosas que los sembrados en monocultivos. En cuanto a la profundidad de roturación no hay ningún efecto en los rendimientos y para obtener buenos rendimientos es necesario aplicar fertilizantes minerales. El efecto de la aplicación del estiércol no es muy claro ya que su acción es muy tardía.

Muñoz *et al.*, (1995), en su trabajo sobre enraizamiento de cuatro diferentes cultivos en tepetetes rehabilitados en Tlaxcala, México, señalaron que en un rotocultivo dominado por el maíz la profundidad óptima de rehabilitación debe ser mayor de 30 cm. para evitar riesgos de una competencia por partes de las raíces. Las raíces del cultivo de cebada y de frijol todavía se desarrollan bien en un horizonte rehabilitado de grosor reducido.

Fechter *et al.*, (1995), sostiene que la estabilidad de los agregados de los tepetates permite determinarse en forma sencilla y fácil de imitar con ayuda del método de percolación. El uso de este modelo demostró que la labranza del suelo no tiene influencia en la estabilidad de los agregados del suelo. Contrariamente a este hecho, es posible que la labranza sea responsable de las diferencias de la distribución del tamaño de los agregados en estas partes de los horizontes rehabilitados. A través de la destrucción continua de agregados grandes se alcanzan tanto un contenido reducido de agregados menores a 3 mm en la parte trabajada como un enriquecimiento de agregados gruesos mayores a 3 mm.

Sin embargo, en los duripanes interviene otro factor muy importante que es el efecto cementante de la sílice amorfa, material que se encuentra en abundancia en este tipo de tepetates de origen volcánico. La conjunción de ambos factores, es decir, el efecto de las plantas y la agregación por sílice, constituyen la base de la agregación y disgregación en estas capas cementadas. De este modo, es posible modificar sus características, evitar su degradación, estudiar el efecto de diferentes especies sobre la disgregación y formación de agregados y favorecer la formación de suelo. En resumen, sentar las bases para su incorporación al proceso productivo.

### **3. INVESTIGACION SOBRE SUELOS CON TEPETATES EN EL ESTADO DE MORELOS.**

Con base en la necesidad de conocer y contribuir al conocimiento de los suelos desarrollados a partir de materiales volcánicos del estado de Morelos, se han realizado estudios mediante la descripción de sus propiedades físicas, químicas, mineralógicas y microbianas, que originan una micromorfología en el mismo y nos pueden describir combinados con otros factores como lo son; la topografía, vegetación, clima, organismos y el tiempo, su formación y su génesis. Se reconoce que los suelos de cenizas volcánicas desarrollados a partir de materiales originales recientes son suelos muy fértiles pero que requieren de un manejo especial para no provocar su degradación que conlleva a su pérdida por erosión.

Los trabajos realizados fueron en la parte noreste, norte y noroeste del estado, así como ensayos de laboratorio e invernadero sobre el efecto de algunas especies vegetales en la agregación y la incorporación de los tepetates al proceso productivo. estos trabajos han sido los siguientes:

#### **3.1. Caracterización y morfogénesis de las capas endurecidas (tepetates).**

En caracterización de los tepetates y morfogénesis, tenemos que Flores *et al.*, (1990), definieron que los fragipanes del noreste del estado de Morelos son de origen geológico, se formaron a partir de materiales piroclásticos, la compactación fue causada por periglaciares, señala que en el norte y noroeste de dicho estado existen otros fragipanes de posible origen pedológico, donde la compactación pudiera deberse a efectos de drenaje y mecánica de las arcillas. concluyendo, "la génesis diferente de estos fragipanes ha provocado, por causas aún no



establecidas diferenciadas en la intensidad y velocidad de la degradación de los suelos”.

Flores *et al.*, (1992), en génesis del suelo y el fragipán, señalan que la superficie del área de estudio esta cubierta por tobas y depósitos clásticos de materiales volcánicos del Pleistoceno. Estos últimos, con el paso del tiempo, han sufrido un proceso de consolidación y cementación ligera, debido a la presencia de la sílice, derivada de la meteorización lenta y prolongada de feldespatos y minerales ferromagnesianos, como la meteorización rápida del vidrio volcánico y materiales amorfos, hasta constituir una toba que yace bajo estos suelos. Apartir de estas tobas, se inicio la formación de los suelos, pedogénesis que ha sido interrumpida reiteradamente por el aporte sucesivo de piroclastos.

Marañón (1994), trabajó en el municipio de Tetela del Volcán concluye, que con base a la carecterización morfológica de cuatro perfiles en estudio, dos de ellos son duripanes, uno fragipán y el ultimo no presentó horizonte endurecido. En el análisis morfogénético, detectó dos perfiles bien desarrollados evolutivamente, con horizontes de acumulación y dos con horizontes A-Cqm, no evolucionados. Los suelos estudiados se clasificaron como Luvisoles y Andosoles.

Flores, *et al.*, (1996), en un estudio en el norte del estado de Morelos sobre duripanes manifiesta que los perfiles pedológicos tienen desarrollo evolutivo alto, en las fracciones de limo y arena muy fina, dominan las partículas de redondez y subangulares y esféricidad baja, los duripanes contrariamente al solum, presentan un número menor de poros, siendo estos de menor diámetro, discontinuos y cerrados parcialmente. En los duripanes la resistencia a la compresión simple presentan valores bajos y fueron detectados contenidos altos de  $Al_2O_3$  en la matriz cementante del duripán.

Las conclusiones mas importantes son: petrográficamente los duripanes son depósitos de piroclastos de composición intermedia, la fracción arcillosa esta dominada por caolinita y metahalloysita, los suelos son considerados paleosuelos, resultantes de un evento paleobioclimático (glaciación), y los duripanes son de origen ígneo, con aportes secundarios pedogenéticos.

Gonzalez (1996), profundiza en el estudio de suelos y materiales endurecidos del áreas estudiada por Marañon *op. cit.*, los suelos fueron caracterizados como poco desarrollados, donde los contenidos de arcilla fueron suficientes para los horizontes B2t desde el punto de vista taxonómico. La esfericidad y redondez de las particulas de limo y la arena muy fina son bajas y subangulares respectivamente, lo que fue debido a su deposito *in situ* y a procesos de compactación y alteración que pudieron ser causados por glaciación. La densidad aparente alcanzó los valores mas altos en el fragipán y el duripán y la porosidad total inversamente proporcional.

De las pruebas no efectuadas por Marañon *op. cit.*, se realizó la clasificación morfológica de campo, donde se estimaron los cambios morfológicos que se han desarrollado entre los horizontes y el material parental. La haploidización de las características morfológicas de los suelos a través del tiempo, propician un aparente valor bajo que incorrectamente los ubican como suelos pocos evolucionados. Pero en realidad se trata de perfiles fuertemente argilizados sin características contrastantes bien delimitadas, que manifiestan un nivel de evolución. Así se trata de suelos policíclicos, suelos truncados o suelos degradados por la erosión o sepultamiento y que han sido sometido a nuevos procesos edafogénicos. Así mismo, la prueba de infiltración e infiltración acumulada indicaron que los valores en el suelos fueron mayores que en las capas endurecidas. Los analisis mecánicos en la estabilidad de un fragmento de material endurecido en H<sub>2</sub>O y en una solución de KOH (30%) donde se determinó que el perfil 11 es un fragipán, el perfil 12 y 13 fueron duripanes.

En la resistencia a la compresión no confinada, se registraron valores de 1.2 kg/cm<sup>2</sup> típico de un fragipán débilmente cementado a 8 y 24 kg/cm<sup>2</sup> valores de los duripanes, éstos últimos con mayor contenido de cementante silícico. En pérdidas y ganancias de óxidos totales de los horizontes intemperizados, manifestaron alteraciones bajas, señalando el bajo nivel de evolución de los que son suelos muy evolucionados, pero que fueron rejuvenecidos por procesos, principalmente volcánicos y tectónicos. Los minerales encontrados fueron la haloisita y montmorillonita, los suelos fueron clasificados como Luvisoles

### **3.2. Ensayos con especies vegetales en la recuperación de tepetates.**

Velázquez (1997), en sus estudios sobre disgregación, alteración y agregación de los tepetates por especies vegetales en condiciones de invernadero, concluye que la posible unión fisicoquímica y biológica de los fragmentos menores de 0.05 mm, permite la formación de agregados de 0.05 a 2.0 mm de diámetro. Las condiciones de drenaje confinado, el crecimiento radical y la alteración del tepetate por efecto de los tratamientos, provocaron una ligera alcalinización del tepetate, las especies arbóreas y el pasto Rhodes fueron las que aportaron mayor cantidad de materia orgánica y favorecieron los mayores porcentajes de agregación y estabilidad en húmedo de los agregados del tepetate, el humedecimiento-secado y el crecimiento radical, fueron factores determinantes en la desintegración y disgregación del tepetate. Al incrementarse la modificación del tepetate conforme aumenta el tiempo de permanencia de las especies vegetales, la formación de suelo a partir de este material constituye un proceso posible a mediano y largo plazo para su habilitación e integración al proceso productivo.

### **3.3. Incorporación de los tepetates al proceso productivo.**

Acevedo (1998), en sus trabajos sobre incorporación al proceso productivo de los tepetates, bajo condiciones de invernadero, trabajó sobre la determinación de la formación y estabilidad de agregados a partir de tepetates fragmentados y evaluación de los efectos de especies vegetales y abonos en la agregación, para esto, utilizó tepetates de color blancos y amarillos en macetas. Se adicionó estiércol de bovino y gallinaza. las especies fueron: *Chloris gayana*, *Leucaena esculenta* y *Psidium guajava*. El diseño experimental fue tetrafactorial con arreglo completamente al azar y tres repeticiones.

Los coeficientes de dispersión en el tepetate blanco fueron altos con tendencia a disminuir; en tepetate amarillo, los valores fueron medios a alto y tendieron a aumentar; la estabilidad estructural fue alta; los agregados que predominaron en seco fueron de 7 a 10 mm; los agregados estables en agua se concentraron en las fracciones mayores de 5 mm; el tepetate amarillo presentó una menor macroestructuración y mayor disgregación, en relación al tepetate blanco.

Las conclusiones señalaron: los coeficientes de dispersión altos no correspondieron a coeficientes de estabilidad estructural bajo; los tratamientos sin planta y sin abonos presentaron porcentajes de agregados estables iguales o mayores a los obtenidos con los abonos; la macroestructuración estuvo más influenciada por las especies que por los abono; el pasto Rhodes produjo la mayor agregación en seco y en húmedo.

#### **4. HIPOTESIS DE TRABAJO.**

En la formación de las capas endurecidas, intervienen modalidades de combinación de los procesos geológicos y pedológicos que al interactuar sobre los diferentes tipos de suelo en cierto ámbito climático, determinan características morfológicas, físicas, químicas, mecánicas, mineralógicas y biológicas propias de estos materiales.

En los suelos de la parte noroeste del estado de Morelos se plantea la ocurrencia de capas endurecidas, por la existencia de condiciones agroecológicas apropiadas para su desarrollo en la zona de estudio, así como la aparición de los efectos de la interacción del hombre en los ecosistemas naturales.

#### **5. OBJETIVOS.**

##### **5.1. Objetivo general.**

Establecer la existencia de las capas llamadas endurecidas (duripanes y fragipanes) en esta área, mediante el análisis morfogenético de los suelos, apoyado en el estudio de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas y buscar la interrelación entre los factores externos e internos del suelo, que han influenciado en la formación de los horizontes compactados o cementados.

**5.2. Objetivos específicos.**

1. Caracterizar morfológica y taxonómicamente los suelos y las capas endurecidas (duripanes y fragipanes) estudiados.
2. Generar información sobre la génesis de las capas endurecidas y de los suelos.
3. Contribuir al conocimiento de las capas endurecidas del estado de Morelos.

## 6. CARACTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO.

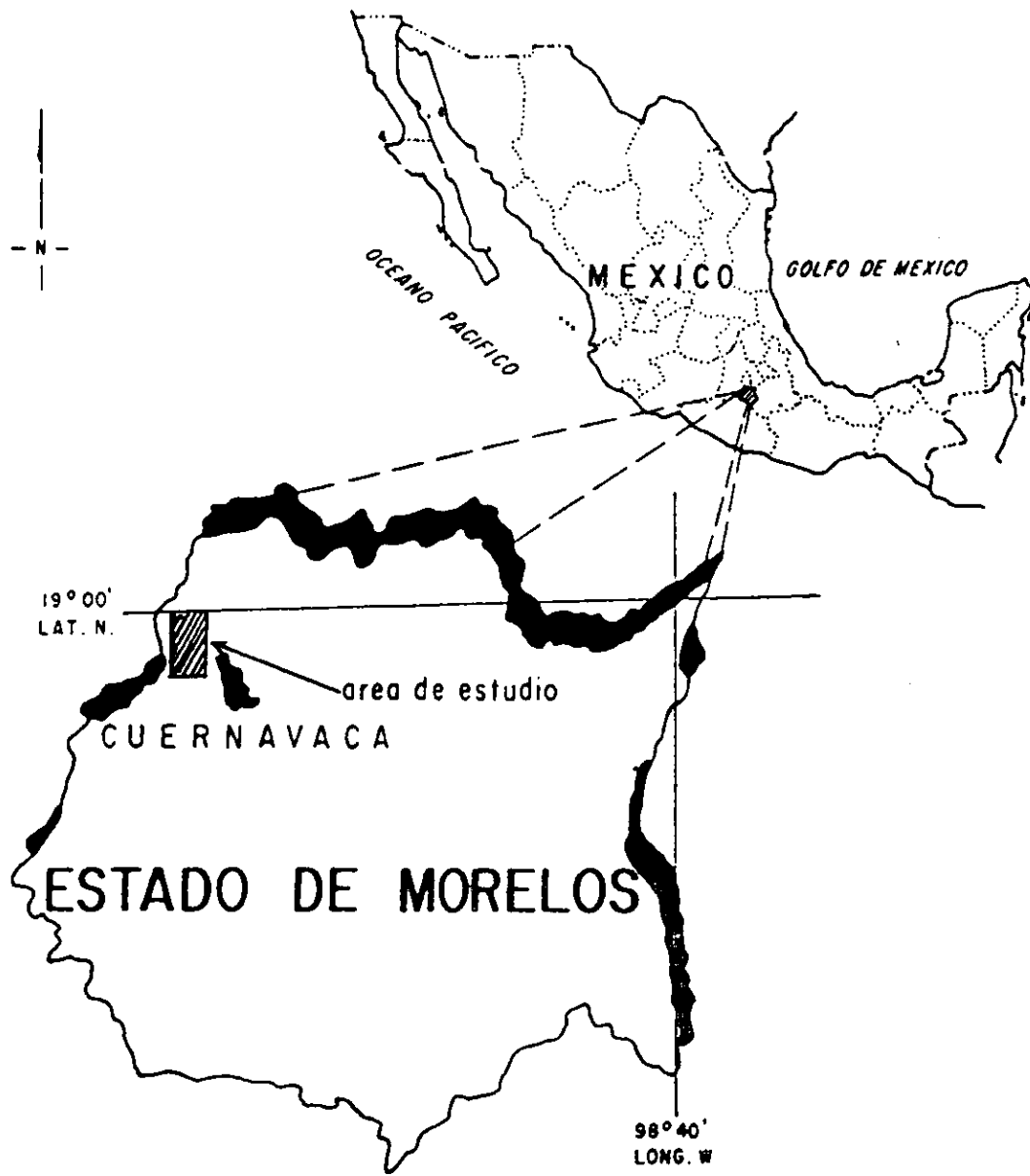
El estado de Morelos, geográficamente se encuentra en la parte meridional de la Zona Central de la República Mexicana, al sur del Eje Neovolcánico, entre los 18° 22' 08" y 19° 07' 10" de latitud norte y los 98° 37' 08" y 99° 30' 09" de longitud oeste del Meridiano de Greenwich. Limita al norte con el Distrito Federal y el estado de México; al este y sureste con Puebla; al sur y suroeste, con Guerrero; y al oeste con el estado de México ( Figura 12).

El estado de Morelos tiene una superficie de 4,958.2 km<sup>2</sup> que significan el 0.25 % del territorio Nacional y cuenta con una población aproximada de 1'195,059 habitantes de acuerdo al Censo de Población y Vivienda, 1990. La Población Económicamente Activa (PEA) es de 359. 8 miles personas, de las cuales 348.4 mil están ocupadas y el 3 % están desocupadas. La población ocupada por rama de actividad, como se observa en la figura 13, el sector agrícola ocupa el 20% del total de la PEA con trabajo, y el sector servicio, comercio, construcción e industrial tienen el 63% del total.

En la figura 14, se observa las tendencias de la población urbana y rural en el estado, en el censo de 1950 del total de la población que fueron 272.8 miles de pobladores, el sector rural ocupaba el 57% de la población y el resto la urbana. Para 1990, del total, la población urbana es el 86%, cabe hacer el señalamiento que la población rural ha permanecido constante y hasta con un ligero incremento con respecto a 1950, sin embargo, el crecimiento de la población de las ciudades desde 1970, se ha cuadruplicado dando una densidad de población de 242 personas/km<sup>2</sup>.

Gran parte de esta población se encuentra en el municipio de Cuernavaca, lo cual es indicativo que la ciudad de Cuernavaca tiene una fuerte explosión demográfica

Figura 12 LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO



Escala Aprox. 1:1000 000



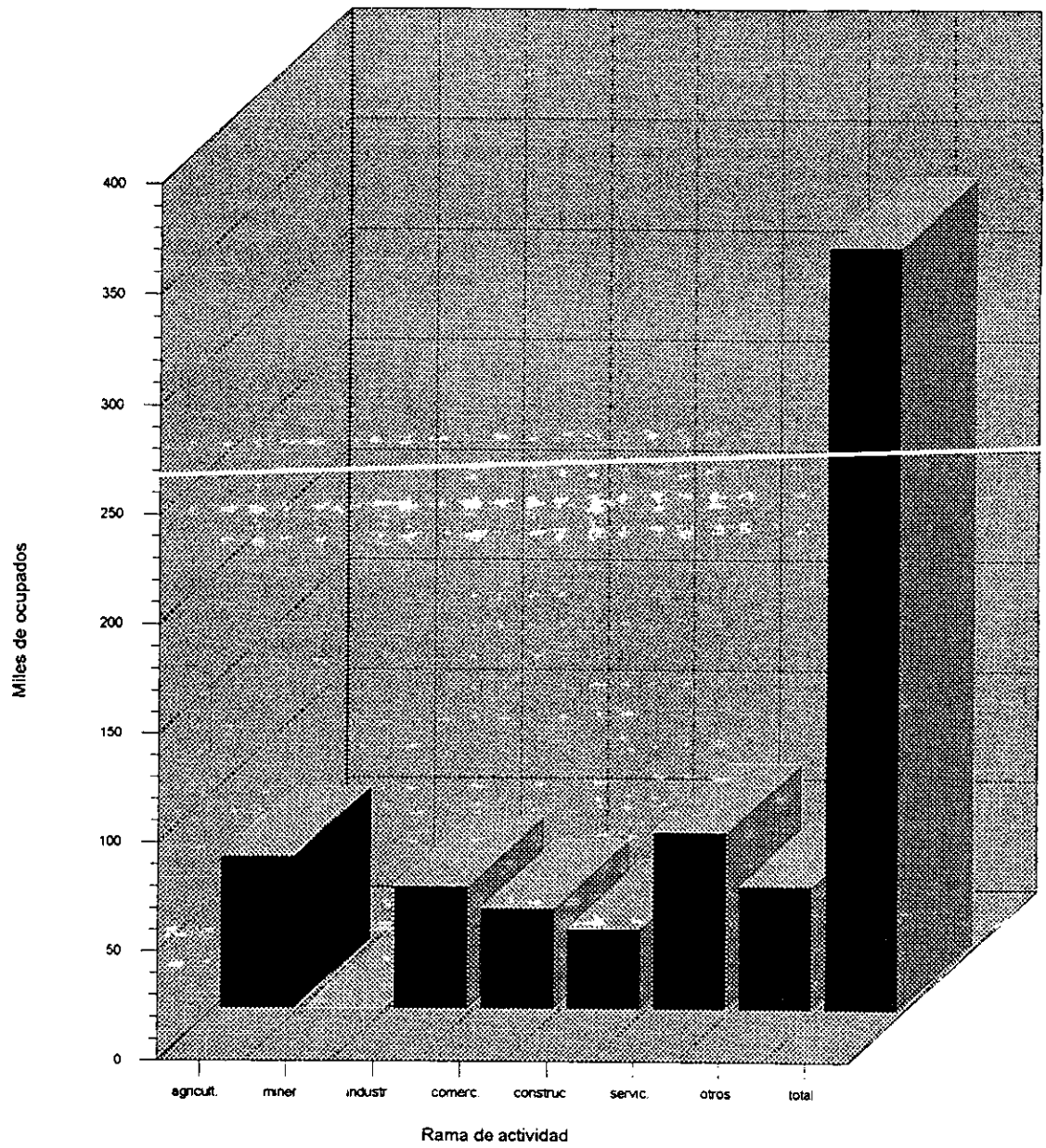


Figura 13. POBLACION OCUPADA POR RAMA DE ACTIVIDAD EN EL ESTADO DE MORELOS

FUENTE: Censo de Población y vivienda. INEGI, 1990

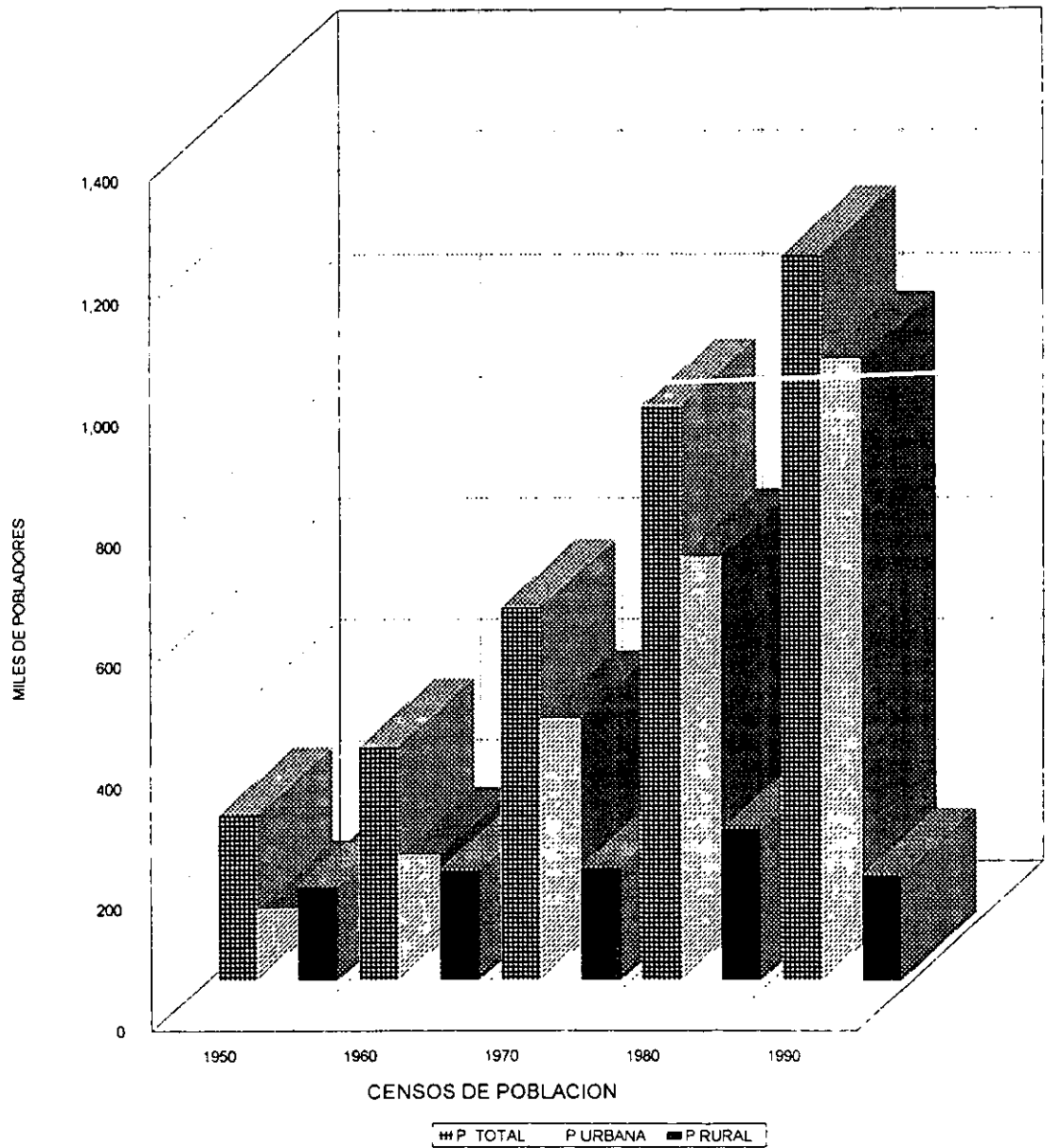


Figura 14. COMPORTAMIENTO DE LA POBLACION URBANA Y RURAL EN EL ESTADO DE MORELOS PERIODO 1950-1990

FUENTE Censo de Población y Vivienda. INEGI, 1990

que tiende a invadir más áreas de bosques, tal como fue constatado en los recorridos de campo.

### **6.1. Localización del Área de Estudio.**

El área de estudio se encuentra en la parte noroccidental del estado de Morelos, en el municipio de Cuernavaca, sus coordenadas geográficas externas son: al norte el paralelo 19° 00' 00", al sur el paralelo 18° 55' 00" de latitud norte; hacia el oeste el meridiano 99° 21' 1" y al este el meridiano 99° 15' 00" longitud oeste. Aunque geográficamente esta zona de estudio se sitúa dentro de la región fisiográfica denominada Sierra Madre del Sur, su geología y edafología corresponden al Eje Neovolcánico.

La parte sur, se encuentra en las altitudes próximas a los 1,700 m.s.n.m., al este limita con la ciudad de Cuernavaca, que está en los 1,543 m.s.n.m., al oeste con los límites del estado de México, en el centro del área de estudio se encuentra la población rural denominada Buenavista del Monte, este poblado se encuentra ubicado a una altitud de 1,850 m.s.n.m.

El acceso al área de estudio es por la carretera de Cuernavaca-Chalma, esta es revestida, bastante peligrosa por sus múltiples curvas y cañadas profundas, antes de llegar a la población de Buenavista del Monte se tiene que pasar por la desviación a Mexicapa y Chalma, siguiendo al poblado de Tlatempa. (Figura 15).

### **6.2. Relieve.**

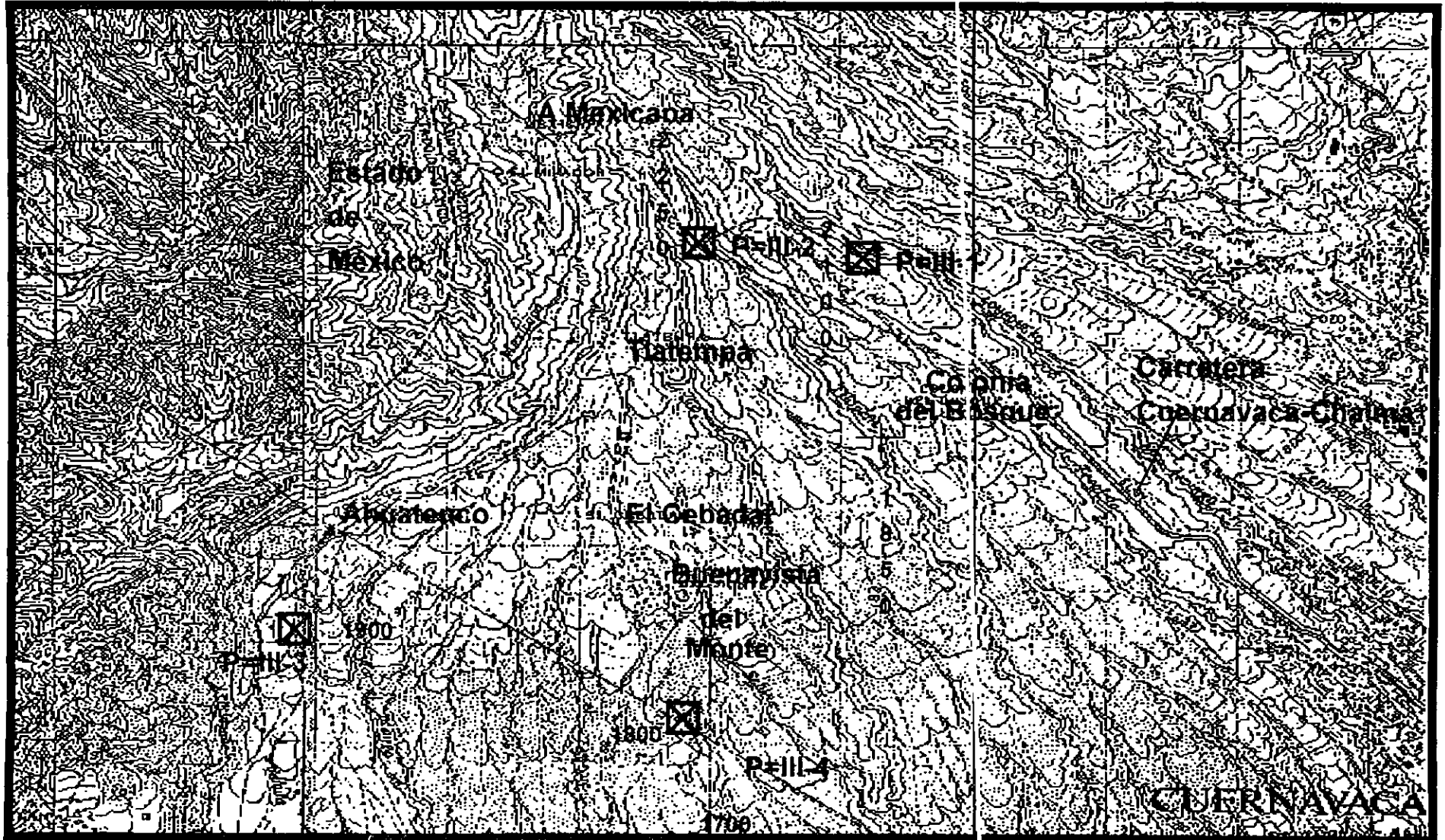
La superficie donde se realizó el trabajo es irregular, tiene altitudes que varían desde su parte más baja que es un poco más de los 1,700 m.s.n.m., en el centro alcanza una altitud de 1,850 m.s.n.m., y es donde está ubicada la población de

19° 00'

99° 20'

19° 00'

99° 15'



18° 55'

99° 20'

Escala Aproximada 1:50,000.



= Perfil de suelos

18° 55'

99° 15'

Fuente: S. S. P. 1983.

Figura 15. Ubicación del área de estudio

Carta Topografica

Buenavista del Monte, existiendo altitudes mayores de los 2,250 m.s.n.m. hasta los 2,500 m.s.n.m. en la parte norte.

El glacis de Buenavista del Monte se forma al pie de las montañas, como producto de la acumulación de sedimentos procedentes de la denudación de relieves montañosos expuestos a la erosión, por lo tanto, como paso esencial y preliminar es necesario examinar la morfología de los macizos montañosos (Ortiz, 1977).

En el área existen algunos lugares más o menos planos y ondulados, son pocos y reducidos en tamaño, los lugareños aprovechan estas superficies en la explotación agrícola de autoconsumo. Los mecanismos morfoclimáticos posteriores al volcanismo del plioceno superior y los procesos erosivos implícitos en este lapso, se han encargado de generar una nueva geomorfología que ha borrado toda expresión topográfica original (Ortiz, 1977).

Actualmente los interfluvios se encuentran limitados por una red de valles en forma de V, en la parte de la montaña que se sitúa entre los 2,250 y 2,000 m.s.n.m., la amplitud del relieve y la cresta tienen un desnivel que oscila entre los 200 a 300 m. (Ortiz, 1977).

Esta fuerte discerción del relieve da lugar a vertientes abruptas con pendientes de 30° y 40°, pero a pesar del fuerte gradiente, las vertientes se conservan en un relativo estado de equilibrio, pues en ellas no existen procesos de abarrancamientos, no se presentan problemas de inestabilidad o asentamiento. En las bases de las vertientes no hay depósitos coluviales que permitan suponer algún transporte fuerte de material, en ellas solo se verifican una incipiente escorrentía que es menguada por la carpeta de hojarasca y el estrato herbáceo.

El escurrimiento concentrado y su trabajo en la erosión lineal queda limitado al lecho de los talwegs(Ortíz, 1977). Característica de una Morfología joven( Dr. Silva Mora comunicación personal, 10/10/98).

### **6.3. Fisiografía.**

En el estado de Morelos se localizan dos provincias fisiográficas, siendo estas, Provincia Eje Neovolcánico Transversal y la Provincia Sierra Madre del Sur. La provincia Eje Neovolcánico Transversal se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas andesíticas, depósitos en diversos episodios volcanicos que se originaron a mediados del Terciario (unos 35 millones de años atrás), esta integrada por grandes sierras volcánicas, conos dispersos y amplios estrato-volcanes y depósitos de arenas y cenizas dispersas en extensas planicies. En esta provincia en su norte, este y sureste, queda comprendida las subprovincias de Lagos y Volcanes de *Anáhuac* y la del Sur de Puebla (S.S.P., 1981).

Con base en los estudios de cartografía y recorridos sobre el terreno, el área de estudio queda comprendida en la provincia fisiografica Eje Neovolcánico Transversal y la subprovincia de lagos y Volcanes de *Anáhuac* colindando en su parte sur con la Provincia Sierra Madre del Sur( Figura 16).

### **6.4. Geología.**

Morelos se encuentra ubicado en la plataforma Morelos-Guerrero, en la que se desarrollaron importantes depósitos marinos del mesozoico. La secuencia sedimentaria marina expuesta en esta región cubre un rango cronoestratigráfico que varia desde el Jurásico Superior hasta el Cretacico Superior. Esta secuencia descansa sobre un basamento metamórfico Precámbrico, representado aparentemente por Esquistos Taxco. (Frías, 1960; De Cserna *et al.*, 1975; S.P.P., 1981).

Figura 16 PROVINCIAS Y SUBPROVINCIAS DEL ESTADO DE MORELOS



— Límite de Provincias  
..... Límite de Subprovincias

Existen afloramientos de rocas ígneas recientes y sedimentarias del Cretácico inferior, litológicamente clasificadas como calizas, areniscas, lutitas y conglomerados que llegaron a formar una secuencia de más de 1,200 metros de grosor, desarrollados en el intervalo de Turoniano-Campiano. Las rocas sedimentarias son más antiguas y pertenecen al Cretácico inferior, las rocas volcánicas son más jóvenes y abundantes y pertenecen al Cuaternario.

Las estructuras geológicas más notables son las constituidas por los aparatos volcánicos y espesos derrames de lava. Los rellenos de los valles están formados por depósitos aluviales del Cuaternario. Además existen gran número de conos cineríticos y brechoides que sobresalen del grueso de paquetes de lavas. Las rocas sedimentarias del Cretácico forman estructuras plegadas (anticlinales y sinclinales). Los depósitos aluviales forman las planicies de las cuencas del Balsas. INEGI, (1981).

Las formaciones que comprendidas dentro del área de estudio en el estado de Morelos son; Tepoztlán (Tomt) con depósitos de volcanoclasticos, principalmente lahares de composición Adesítica, (depósitos clásicos de origen adesíticos). La formación Cuernavaca (Tpc) compuesta de conglomerados, derrames de lodo, cenizas volcánicas, travertino y yeso (tobas) y la formación Adesita de Zempolá (Tm pz) que tiene derrames de lava, material volcanoclasticos y lahar interestratificados, principalmente de composición Adesítica y Riodacita, (lava, tobas y brechas adesíticas). (Ortiz, 1977 y De Cserna y Carl Fries, Fr., 1981).

El área de estudio, se encuentra enclavada en la parte norte del glacis de Buenavista del Monte, que de acuerdo con Ortiz (1977), el glacis está constituido en su mayor totalidad por la formación Cuernavaca, denominada así por Frías (1960), y cuya edad probable es del Plioceno superior y que seguramente alcanza hasta el reciente. (Figura 17).



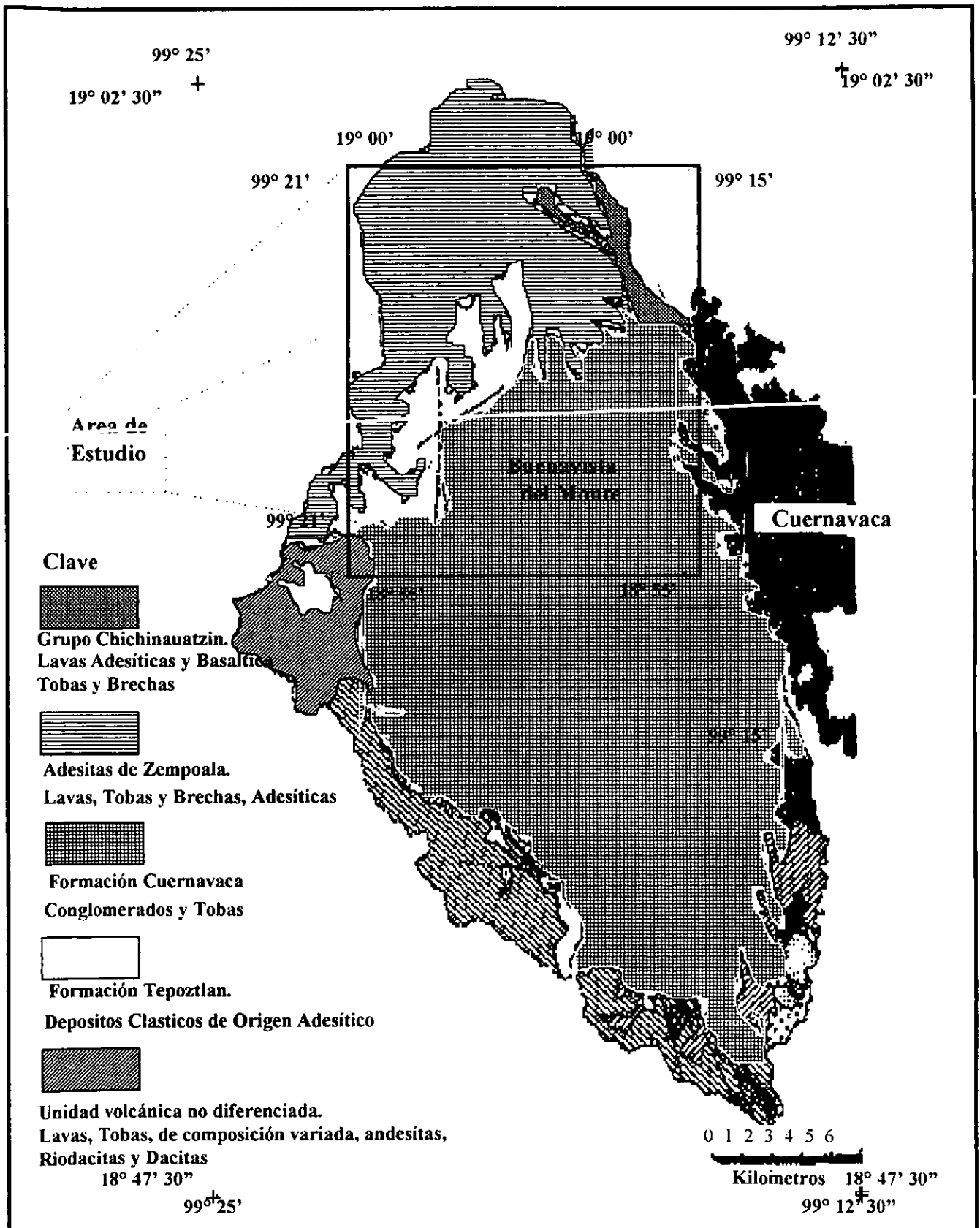


Figura 17. Geología del área de Estudio. Fuente: Modificado de Ortiz, 1977.

### 6.5. Hidrología.

Morelos queda comprendido en parte de la región hidrológica "Río Balsas", con una superficie de 4,958.22 km<sup>2</sup> esta, también es conocida como Atoyac, Mezcala o Zacatula, es uno de los mas importantes de México y se ubica entre los paralelos 17° 00' y 20° 00' latitud norte y los meridianos 97° 27' y 103° 15' de longitud oeste. El estado cuenta con 3 cuencas hidrológicas, cuenca "A" tiene una superficie de 4,303.39 km<sup>2</sup>, la "B" es de una área de 653.1 km<sup>2</sup>, y la cuenca "F" 1.66 km<sup>2</sup>. En la figura 18, se pueden observar las diferentes cuencas hidrológicas.

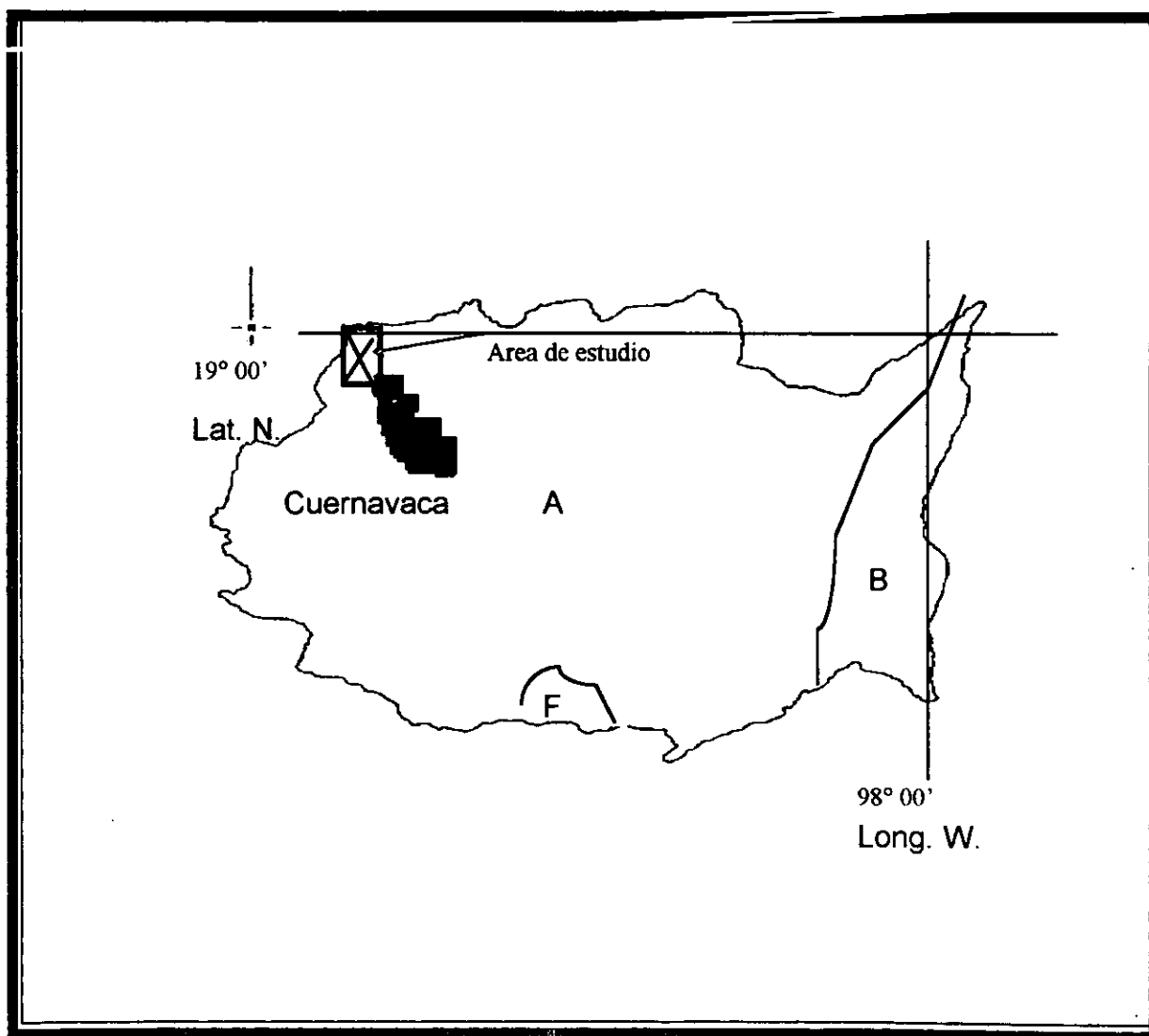


Figura 18 . Regiones hidrológicas del estado de Morelos.

Fuente: Modificado de S.P.P. 1981.

El área de estudio, esta comprendida en la parte superior de la cuenca "A", donde los interfluidos se encuentran limitados por una red de valles en forma de V; en la parte alta de la montaña, entre 2, 500 y 3, 000 m.s.n.m. La amplitud de relieve entre el talweg y la cresta del interfluido supera en ocasiones los 500 metros de desnivel, aunque generalmente la amplitud varia entre los 300 y 500 metros en cambio, la parte mas baja de la montaña situada entre 2, 000 y 2, 500 m.s.n.m., el desnivel suele ser de 200 a 300 metros.

En determinadas ocasiones, por la intensidad de las acciones hídricas provocadas por los fuertes aguaceros, tienen lugar el fenómeno de remoción en masas, que se lleva acabo localmente en los flancos de la vertientes. Este proceso se identifica en el campo por estrechos y largos lóbulos de deslizamientos cuyo material es arrastrado hasta los valles; en el corredor de los lóbulos con frecuencia se distinguen estructuras de flujo que demuestran ser muy recientes, pues aún no se restaura vegetación y los depósitos contienen todavía los troncos de los árboles. Dichas características corresponden, según la dosificación de Zaruba y Mencl señalado por Ortiz (1977), a movimientos de posiciones formados por el flujo de tierras y escombros, el fenómeno es posible de ocurrir cuando el suelo de las pendientes queda saturado con agua, entonces puede suceder que la fricción interna o intergranular y la cohesión se reduzca a cero y por tanto, el material salido se comporte como líquido (licuefacción) Ortiz, (1977).

### **6.6. Clima.**

En el estado de Morelos, predominan los climas cálidos que rigen sobre todo en las zonas bajas de los ríos Amacuzac y Nexapa. En menor grado se presentan climas de tipo semicálido, en una franja que va de este a oeste situada en la región norte, en las zonas de transición entre las sierras y los valles. Templado o mesotérmico se distribuye en la zona norte y se localiza en las partes altas de los

valles de Cuernavaca principalmente. Los climas semifríos se reducen a pequeñas áreas en el extremo norte, concentrándose en las partes más altas de la sierra, como son la Cordillera Neovolcánica y la Sierra Nevada o Transversal, S.S.P. (1981).

Acorde a la información proporcionada por la carta de climas de la Secretaría de la Presidencia [Comisión de Estudios del territorio Nacional y Planeación (CETENAL)] y la Universidad Nacional Autónoma de México (Instituto de Geografía) en el año 1970, donde se utilizó la clasificación de climas de Köppen modificada por Enriqueta García (1964), al área de estudio le correspondieron dos clases de climas, esto dependiendo; de su latitud, altitud y asociaciones vegetales, así como la importante correlación de la temperatura y precipitación en cada una de las zonas.

Primeramente en la parte sur y sureste de la superficie en estudio, a una altitud que varía desde los 1,700 hasta los 1,900 m.s.n.m., encontramos un clima (A)C (w<sub>2</sub>)(w)big, es decir semicálido el más cálido de los climas templados, con temperatura media anual mayor de 18° C, y la del mes más frío de 18° C; el más húmedo de los subhúmedos, con lluvias de verano; tiene un porcentaje de lluvia invernal del 5% de la total anual, isotermas con oscilaciones térmicas menor del 5% y debido a que el mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano, la marcha de la temperatura es de tipo ganges.

Los fenómenos climáticos que inciden en esta área son: frecuencia de granizadas los rangos de probabilidad de que esto suceda es de 0-2 días por año; el fenómeno de frecuencia de heladas, el rango oscila de 0-20 días por año.

Como se señaló anteriormente, esta información climática data de 1970 de la mencionada fuente, es decir, tiene una antigüedad de 28 años, por lo cual, con los disturbios ecológicos efectuados en el transcurso de este tiempo por el

hombre en esta zona, el clima tiende a variar y en la actualidad, este se encuentra ordenado por Enriqueta García, (1988), con la misma clasificación de Köppen modificada como; (A)Ca(w<sub>2</sub>)(w)big, es decir, a, se adiciona y significa que existen veranos cálidos, con una temperatura media del mes más caliente mayor de 22° C, donde el factor temperatura tiende a incrementarse por las desforestaciones que se han realizado en la zona en el transcurso de esos 28 años.

En la figura 19, se dan los valores de distribución de la precipitación y temperatura de la estación 15-036 Malinalco, localizada en las coordenadas 18° 58' y 99° 30' en el estado de México y establecida en 1,840 m.s.n.m., y es la estación que más influencia tiene en esta zona de estudio, García, E. (1988).

En la parte superior de la zona, a una altitud que se encuentra desde los 1,900 hasta los 2,500 m.s.n.m., aproximadamente localizamos un clima C(w<sub>2</sub>)(w)big, que corresponde a un clima templado, el más húmedo de los climas subhúmedos, con lluvias de verano, pero con un porcentaje de lluvia invernal menor a 5% de la anual; de verano fresco y largo, la temperatura media del mes más caliente entre 6.5° C y 22° C, isotermal, oscilación menor a 5° C. La precipitación anual es de 1,200 a 1,500 mm. aproximadamente.

Es de mencionarse, que esta información tiene los mismos señalamientos anteriormente indicados de acuerdo a los años de antigüedad, sumados a esto, en el tiempo de realización de la carta de climas en el 1970, la información de esta zona se tomo de la estación 15-030 Joquicingo ubicada en las coordenadas 19° 03' y 99° 06' en los 1,800 m.s.n.m., es decir, está bastante alejada de la zona de estudio.

En ese tiempo, la estación más cercana 17-030 Huitzilac no había generado información cuando menos de 10 años de antigüedad en el período 1921-1960, que fue el que se cuantificó para la realización de la carta climática, esta última

Cuadro 3. Calculo de la clasificación del clima por el segundo sistema de THORNTHWAITE. Estación Malinalco.

CLASIFICACION DEL CLIMA : SEGUNDO SISTEMA DE THORNTHWAITE

Estación: 15-036 Malinalco  
 Estado: De México  
 Localización Latitud: 18° 58'

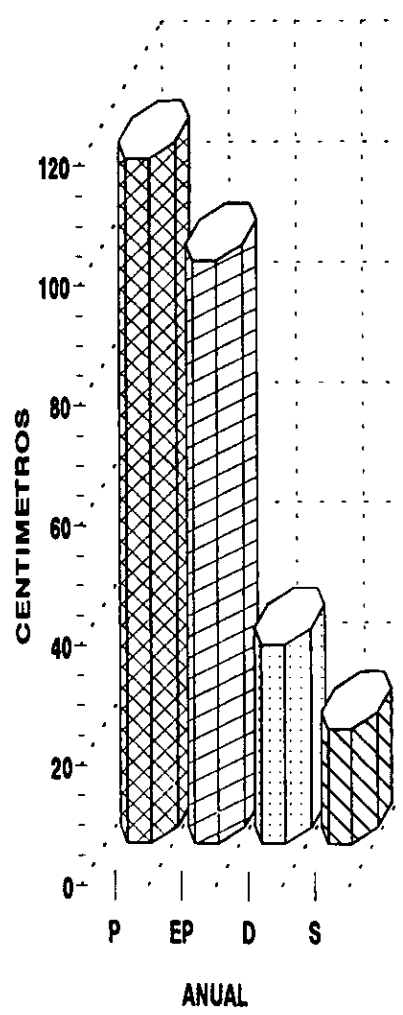
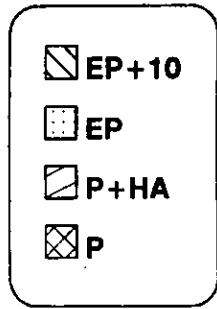
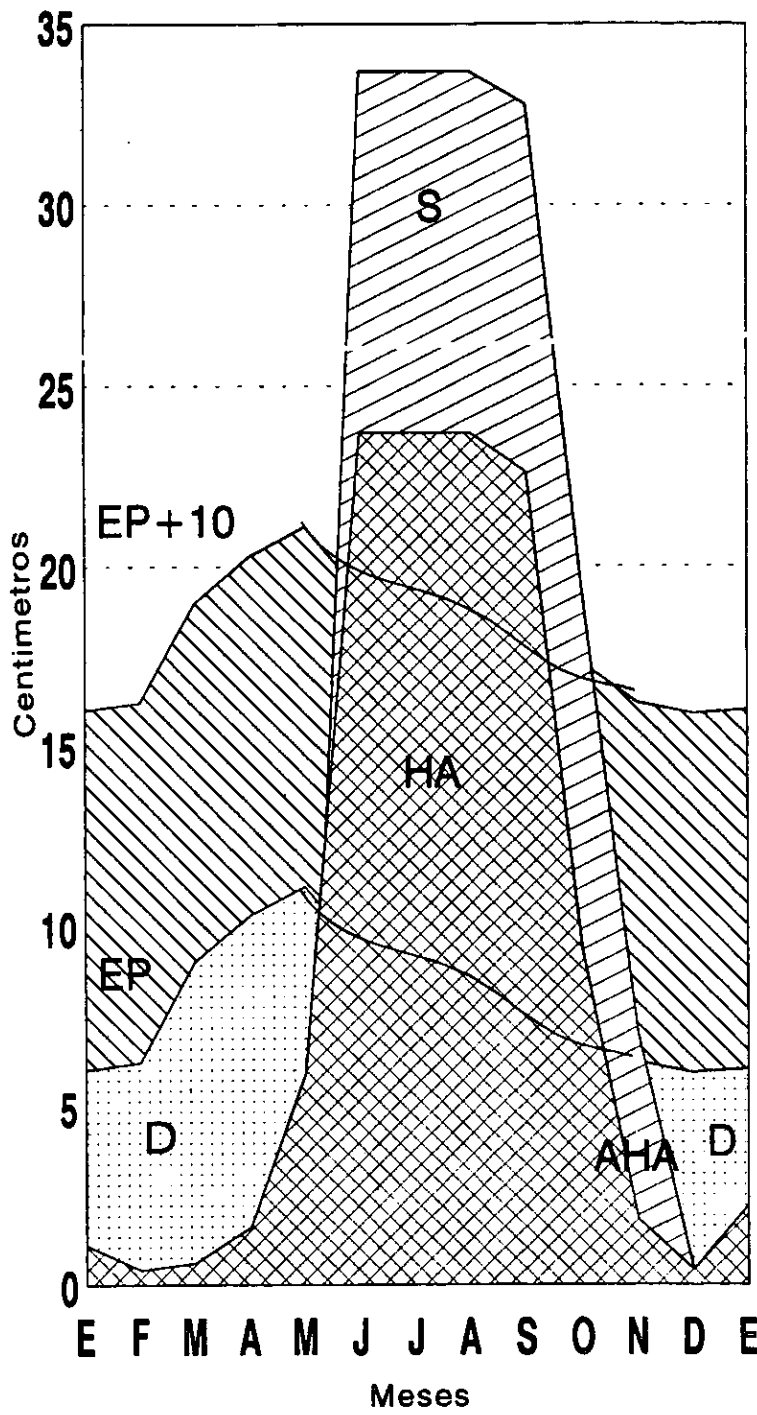
Período de observación  
 Población y Municipio: Malinalco  
 Longitud: 99° 30' Altitud: 1840 msnm

| CONCEPTO                |       | M E S E S |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Valor medio<br>o Anual |
|-------------------------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|
|                         |       | E         | F     | M     | A     | M     | J     | J     | A     | S     | O     | N     | D     |                        |
| Temp. media             | (TE)  | 17.60     | 18.50 | 20.60 | 22.30 | 22.40 | 21.30 | 20.80 | 20.50 | 20.00 | 19.30 | 19.10 | 18.10 | TEA=20.00              |
| Precip. media           | (PR)  | 1.43      | 0.68  | 1.09  | 2.29  | 7.87  | 23.49 | 23.83 | 26.00 | 22.21 | 8.96  | 1.96  | 0.60  | PRA=120.42             |
| Indice de calor         | (ICM) | 6.72      | 7.25  | 8.53  | 9.62  | 9.68  | 8.97  | 8.66  | 8.47  | 8.16  | 7.73  | 7.61  | 7.01  | ICA=98.41              |
| Evapotransp. sin corr.  | (EV)  | 5.59      | 6.23  | 7.85  | 9.31  | 9.40  | 8.43  | 8.01  | 7.76  | 7.36  | 6.82  | 6.67  | 5.94  |                        |
| Factor de corr.         | (FC)  | 0.95      | 0.90  | 1.03  | 1.05  | 1.13  | 1.10  | 1.14  | 1.10  | 1.02  | 1.00  | 0.93  | 0.95  |                        |
| Evapotransp. pot. corr. | (ETV) | 5.31      | 5.61  | 8.09  | 9.78  | 10.60 | 9.27  | 9.13  | 8.54  | 7.51  | 6.82  | 6.20  | 5.64  | EPA=92.50              |
| Mov. de Humedad         | (MH)  | 0.72      | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 10.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | -4.24 | -5.04 |                        |
| humedad almacenada      | (HA)  | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 5.76  | 0.72  |                        |
| Demasia de agua         | (DA)  | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 4.22  | 14.70 | 17.46 | 14.71 | 2.14  | 0.00  | 0.00  | DAA=53.23              |
| Deficiencia de agua     | (DE)  | 3.44      | 4.93  | 7.00  | 7.49  | 2.73  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | DEA=25.59              |
| Evapotransp. real       | (ER)  | 2.15      | 0.68  | 1.09  | 2.29  | 7.87  | 9.27  | 9.13  | 8.54  | 7.51  | 6.82  | 6.20  | 5.64  |                        |
| Escurrimiento           | (ES)  | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 2.11  | 8.41  | 12.41 | 11.74 | 4.75  | 0.54  | 0.00  |                        |
| Relación pluvial        | (RP)  | -0.73     | -0.88 | -0.87 | -0.77 | -0.26 | 1.53  | 1.61  | 2.04  | 1.96  | 0.31  | -0.68 | 0.02  |                        |

Indice de humedad (IH)= 57.55 %      Indice pluvial (IP)= 40.95%  
 Indice de aridez (IA)= 27.66 %      Concentración termica (CT)= 32.05%

|                          |        |                                      |
|--------------------------|--------|--------------------------------------|
|                          | Clave: | Descripción:                         |
| Categoría de humedad     | PD     | Semi húmedo                          |
| Regimen de humedad       | HB     | Moderada deficiencia de agua estival |
| Categoría de temperatura | TC     | Templado-calido.                     |
| Regimen de temperatura   | VA     |                                      |

**CLIMOGRAMA DE LA ESTACION MALINALCO, EDO. DE MEXICO.  
DETERMINACION DEL BALANCE DE AGUA (THORNTHWAITE, 1948)**



EP=Evapotranspiración. P=Precipitación  
S=Demanda de humedad. D=Deficiencia de humedad  
HA=Humedad almacenada. AHA=Aprovechamiento de HA.

Figura 19

estación se encuentra ubicada en las coordenadas 19° 02' y 99° 16'. en una altitud de 2,550 m.s.n.m., y en la actualidad reporta un clima Cb (w<sub>2</sub>)(w)b(i')g, es decir, al clima templado C, se le adiciona la letra b que significa que tiene un verano fresco largo con una temperatura media del mes más caliente entre 6.5° y 22° C y con poca oscilacion, entre 5° y 7° C. (Figura 20 ).

Su precipitación anual es de 1,200 a 1,500 mm., aproximadamente, estas condiciones climáticas conjuntamente con la edáfica, permiten el sostenimiento de una vegetación arbórea, formada por una densa cobertura vegetal, con bosque de oyameles y pinos. A medida que se desciende de altitud se desarrollan los bosques de encino. Dentro de los fenómenos climáticos de esta zona, la frecuencia de granizadas se encuentran en los rangos de 0-2 días y la frecuencia de heladas su probabilidades es de 20 a 40 días por año.

En los cuadros 3 y 4, (paginas 67 y 70) para ambas zonas y con datos de las mismas estaciones, se calculó el clima con la clasificación del segundo sistema de Thornthwaite, (1978), con el objeto de determinar; las demasías de humedad (da), deficiencias de humedad (de), humedad almacenada y aprovechamiento de humedad (ah) con el fin de determinar los periodos críticos del suelo, agua y planta, representados en las figuras 19 y 20 (paginas 68 y71). Estos cálculos demuestran los mese de deficiencia de humedad que pueden presentar los suelos, que serian los periodos críticos para el desarrollo de las plantas existentes en la zonas de estudio.

En los cuadros 3 y 4, se pueden observar los datos de las estaciones 15-036 Malinalco y 15-030 Huitzilac respectivamente, caracterizando la primera con índice de humedad (57.55%) bajos y de aridez (27.66%) altos contrariamente con la estación de Huitzilac que presenta índices de humedad de 123.35% y de aridez de 7.84%. correlacionandoce estos datos con las características de las zonas del área de estudio.



Cuadro 4. Calculo de la clasificación del clima por el segundo sistema de THORNTHWA TE. Estación Huitzilac.

CLASIFICACION DEL CLIMA : SEGUNDO SISTEMA DE THORNTHWAITE

Estación: 15-030 Huitzilac  
 Estado: Morelos  
 Localización Latitud: 19° 02'

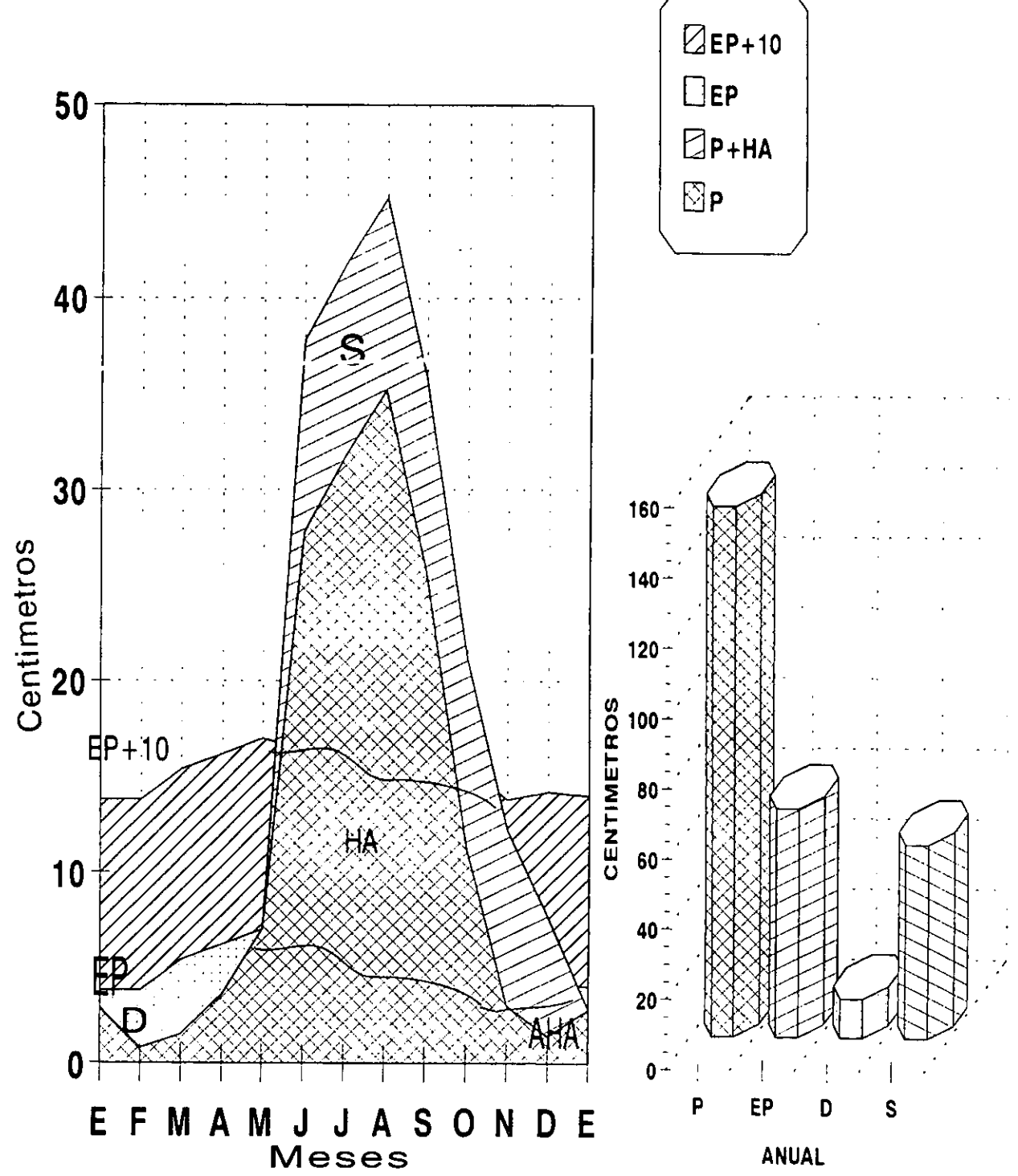
Período de observación: 16 años  
 Población y Municipio: Cuernavaca  
 Longitud: 99° 16' Altitud: 2550 msnm

| CONCEPTO                |       | M E S E S |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Valor medio<br>o Anual |
|-------------------------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|
|                         |       | E         | F     | M     | A     | M     | J     | J     | A     | S     | O     | N     | D     |                        |
| Temp. media             | (TE)  | 9.80      | 10.30 | 11.90 | 13.30 | 13.90 | 13.40 | 12.90 | 13.10 | 12.80 | 12.30 | 11.20 | 10.70 | TEA=12.10              |
| Precip. media           | (PR)  | 2.73      | 0.69  | 1.37  | 3.59  | 7.14  | 27.82 | 31.60 | 35.24 | 25.59 | 11.18 | 2.90  | 1.31  | PRA=151.16             |
| Indice de calor         | (ICM) | 2.70      | 2.99  | 3.72  | 4.40  | 4.70  | 4.45  | 4.20  | 4.30  | 4.15  | 3.91  | 3.39  | 3.16  | ICA=46.07              |
| Evapotransp. sin corr.  | (EV)  | 4.02      | 4.27  | 5.09  | 5.83  | 6.15  | 5.89  | 5.62  | 5.75  | 5.57  | 5.30  | 4.73  | 4.47  |                        |
| Factor de corr.         | (FC)  | 0.95      | 0.90  | 1.03  | 1.05  | 1.13  | 1.10  | 1.14  | 1.10  | 1.02  | 1.00  | 0.93  | 0.95  |                        |
| Evapotransp. pot. corr. | (ETV) | 3.82      | 3.84  | 5.24  | 6.12  | 6.95  | 6.48  | 6.41  | 6.30  | 5.68  | 5.30  | 4.40  | 4.25  | EPA=64.79              |
| Mov. de Humedad         | (MH)  | -1.09     | -3.15 | -1.32 | 0.00  | 0.19  | 9.81  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | -1.50 | -2.94 |                        |
| humedad almacenada      | (HA)  | 4.47      | 1.32  | 0.00  | 0.00  | 0.19  | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 8.50  | 5.56  |                        |
| Demasia de agua         | (DA)  | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 25.19 | 28.94 | 19.91 | 5.88  | 0.00  | 0.00  | DAA=79.92              |
| Deficiencia de agua     | (DE)  | 0.00      | 0.00  | 2.55  | 2.53  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | DEA=5.08               |
| Evapotransp. real       | (ER)  | 3.82      | 3.84  | 2.69  | 2.59  | 6.95  | 6.48  | 6.41  | 6.30  | 5.68  | 5.30  | 4.40  | 4.25  |                        |
| Esguerrimiento          | (ES)  | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 12.60 | 20.77 | 17.20 | 7.92  | 1.47  | 0.00  |                        |
| Relación pluvial        | (RP)  | -0.29     | -0.82 | -0.74 | -0.41 | -0.03 | 3.30  | 3.93  | 4.59  | 3.50  | 1.11  | -0.34 | 0.69  |                        |

Indice de humedad (IH)= 123.35 %      Índice plu vial (IP)= 118.65%  
 Índice de aridez (IA)= 7.84 %      Concentración termica (CT)= 30.17%

|                             |                                     |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| Clave:                      | Descripción:                        |
| Categoría de humedad PD     | Super húmedo                        |
| Regimen de humedad HA       | Pequeñas o nula deficiencia de agua |
| Categoría de temperatura TE | Semi-frío                           |
| Regimen de temperatura VA   |                                     |

**CLIMOGRAMA DE LA ESTACION DE HUTZILAC, MORELOS  
DETERMINACION DEL BALANCE DE AGUA (THORNTHWAITE, 1948)**



EP=Evapotranspiración. P=Precipitación  
 S=Demanda de humedad. D=Deficiencia de humedad  
 HA=Humedad almacenada. AHA=Aprovechamiento de HA.

Figura 20

### **6.7. Suelos.**

Los suelos que existen en el estado de Morelos de acuerdo a las provincia fisiograficas son: en el Eje Neovolcánico Transversal, en los que corresponde a la subprovincia de los Lagos y Volcanes de *Anáhuac*, se tienen Andosoles, Rogosoles, Cambisoles, Acrisoles, Luvisoles, Litosoles, Rendzinas, Feozem, Chernozem y Castañozem. La subprovincia Sur de Puebla contiene los siguientes : Rogosoles, Litosoles, Feozem, y Vertisoles (Figura 16, pagina 60).

En la provincia Sierra Madre del Sur, en su porción de Sierra y Valles Guerrerenses, presenta los siguientes: Andosoles, Rogosoles, Cambisoles, Acrisoles, Litosoles, Rendzinas, Feozem, Chernozem, Fluvisoles, Castañozem y Vertisoles. S.S.P. (1981).

La influencia de la formación de Zempoala que esta ubicada en la parte superior del área de estudio a una altitud de 3,000 m.s.n.m., está constituida en su mayor parte por materiales volcánicos de tipo andesíticos (lavas, tobas y brechas andesíticas) que fueron originando los siguientes suelos determinados por la carta edafológica de DETENAL 1:50,000.(Figura 17, pagina 62).

Según la carta de suelos de DETENAL, Los suelos que existen en el área de estudio, son en su mayor parte Acrisoles órticos, Feozems háplicos y en menor proporción, Andosoles húmicos y Litosoles, esto es considerando la unidad de clasificación FAO/UNESCO 1970, modificada por DETENAL. Su ubicación es en la parte superior norte colindando con el Eje Neovolcánico Transversal y a una altitud de 2,000 a 2,500 m.s.n.m., se encuentran los suelos Andosoles húmicos y en menor proporción los Feozems háplicos, en la parte central del área en referencia se identificaron las unidades de Acrisoles y subunidades órticos, ocupando la mayoría del área de estudio dominando desde una altitud de 2,200 m.s.n.m., hasta 1,700 m.s.n.m. En su mayor parte los Acrisoles órticos se

encuentran asociados con los mismos Acrisoles, pero con la subunidades húmicas, es decir, Acrisoles pero con una aportación de capas de humus de color negro u oscuro frecuentemente ácidos y muy pobres en nutrimentos.

DETENAL señala que en la misma parte del área, pero al oriente, cerca de los límites de la ciudad de Cuernavaca, se encuentran las unidades de suelo consideradas como Litosoles, asociadas con Acrisoles órticos y húmicos. Las áreas que comprenden las unidades de Litosoles son muy poco significativas, alrededor de un 8% del total del área de estudio. Existen dentro del área pero en menor proporción, unidades de suelo Fozzem con subunidades háplicas presentando además características de fases líticas, se ubican principalmente en la parte sur de la superficie en estudio, en esta parte también encontramos Acrisoles órticos con fases dúricas profundas.

### **6.8. Vegetación.**

La vegetación dominante en el Estado, son los bosques de encino, encino-pino, bosques de pino, pino-encino, bosques de oyamel madroño, ocotillo, jara, los pastizales inducidos, la agricultura de riego, de temporal y la selva baja caducifolia, Rzedowski (1978).

Las condiciones climáticas y edafológicas del área de estudio, permiten el sostenimiento de una vegetación arbórea en la mayor parte de la superficie, formada por una densa cobertura forestal con bosques de pino y mesofilo de montaña en las partes más altas, y cañadas respectivamente existiendo asociaciones de pino-encino y encino-pino.

A medida que se desciende de altitud la sucesión vegetativa tiende a efectuar cambios naturales dentro del área, hasta llegar a la vegetación secundaria

arbustiva en las partes más bajas propias del clima que tiende a dominar en esta parte de la zona.

La dinámica de la vegetación se presenta en la forma siguiente: en la parte norte y noroeste a una altitud cercana a los 2,500 m.s.n.m., la vegetación observada es bosque de pino con pequeñas áreas de pastizales de temporal inducidos, a medida que se desciende se encuentran las asociaciones de bosque de pino-encino y a una altitud cercana a los 1,900 m.s.n.m., se empiezan a distribuir los bosques de encino-pino, la vegetación que presenta un mayor valor de dominancia dentro del área, es la de encinos.

En la parte sur del área a una altitud de 1,800 m.s.n.m., se localizan los bosques con hojas latifoliadas y escumiforme de encino-enebro y en esta misma altitud se observa la selva baja caducifolia que conjuntamente con los pastizales inducidos dominan hacia las partes más bajas de la zona. En esta altitud encontramos la mayor parte de las áreas de explotación agrícola de la zona de estudio. Se trata de pequeñas áreas onduladas con terminaciones abruptas que son aprovechadas por los lugareños para la siembra de maíz de temporal para el autoconsumo, generalmente sin fertilizar y el laboreo de la tierra se efectúa con tracción animal. Además, se establece el cultivo de jitomate con fines de comercialización.

A esta misma altitud sobre todo la parte sureste cercana a la ciudad de Cuernavaca se pueden observar las áreas más erosionadas por los escurrimientos superficiales, teniendo como principal agente erosivo a la precipitación, es decir; la deforestación no controlada, el mal manejo del suelo y la explotación demográfica, poco a poco dominan a los ecosistemas naturales.

## **7. MATERIALES Y METODOS.**

Para la realización del trabajo, primeramente se llevo acabo una recopilación de información básica, donde se investigó el grado de avance sobre el conocimiento de los capas endurecidas en México y en el Mundo, evaluándose en cada una la calidad, nivel de trabajo y los resultados obtenidos, así como la selección de cartografía adecuada para la determinación del lugar de estudio y proceder a ubicar los sitios de realización de los perfiles tipo.

Posteriormente, se efectuaron los estudios de gabinete, trabajos de campo y análisis de laboratorio.

### **7.1. Estudios de gabinete.**

#### **7.1.1. Determinación del área de estudio por cartografía y teledetección.**

Con el fin de ubicar el área de muestreo y con base en el análisis de la actividad volcánica de las unidades terrestres, la geomorfología, las facetas, el clima, la vegetación, la actividad humana y la foteointerpretación, según la metodología propuesta por el ITC (Van Zuidam, 1979), se estudió una imagen LANDSAT infrarroja en falso color de escala 1:250,000 y fotografías aéreas verticales en blanco y negro de escala 1:30,000; además, se reunió el material cartográfico de apoyo como; la síntesis geográfica del estado de Morelos a escala 1:250,000, editada por la Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP), (1981), y cartografía de la hoja Cuernavaca E-14-A-59 a escala 1:50,000 de la misma Secretaría (1979), así como la carta de climas México

14Q-V, que comprende parte de los estados de México, Guerrero, D.F., Hidalgo, Michoacán, Guanajuato y Morelos a escala 1: 500,000 editada por la Secretaría de la Presidencia (1970) y para la geología, las hojas Cuernavaca 14Q-h(8) que comprende los estados de Morelos, México, Guerrero y Puebla, y la Hoja Taxco 14Q-h (7) que comprende los estados de Morelos, Guerrero y México a escala 1:100,000, editadas por el Instituto de Geología de la UNAM, publicadas en 1965 y 1981 respectivamente.

Así mismo, de acuerdo a investigación, clasificación y análisis documental, se determinaron las metodologías a utilizar tanto en los trabajos de campo como en los análisis de laboratorio.

## **7.2. Trabajos de campo.**

### **7.2.1. Ubicación de los sitios de muestreo en campo y obtención de muestras.**

Una vez delimitada el área de estudio se procedió mediante recorridos de campo, al reconocimiento del terreno donde, finalmente, se seleccionó un área piloto en la que fueron analizados varios perfiles de suelos, siendo elegidos los cuatro más representativos bajo la siguiente secuencia:

7.2.1.1. Recorrido preliminar de la zona de estudio con base en el apoyo cartográfico.

7.2.1.2. Verificación y ubicación de los sitios a muestrear. Se seleccionaron 4 sitios de muestreo ( Figura 15, pagina 57.), los que tienen la siguiente localización:

Perfil III-1, (PIII-1).- Sitio localizado a 2,100 msnm, en las coordenadas geográficas  $18^{\circ} 58' 29''$  y  $99^{\circ} 18' 18''$ , a un lado de la carretera Cuernavaca-Chalma en el kilometro 7 suelo de uso forestal y una vegetación de pino-encino con bastante influencia humana (En el capítulo 12. Anexos, se tienen fotografías de esta zona y del perfil en la paginas 162 y 164).

Perfil III-2, (PIII-2).- Su localización es a 2,250 msnm, en las coordenadas geográficas  $19^{\circ} 59' 43''$  y  $99^{\circ} 19' 06''$ , cercano a la carretera Cuernavaca-Chalma en el kilometro 8 aproximadamente, cuenta con suelo de uso forestal con una vegetación de pinos con una moderada influencia humana (en el capítulo 12. Anexos, se tienen fotografías de esta zona y del perfil en la paginas 163 y 164).

Perfil III-3, (PIII-3).-Se ubica a 1,900 msnm, en las coordenadas geográficas  $18^{\circ} 56' 28''$  y  $99^{\circ} 20' 18''$ , 2 Kilometros al sur del poblado de Ahuatenco con suelo de uso agrícola, con poca vegetación y gran influencia humana (En el capítulo 12. Anexos, se tienen fotografías de esta zona y del perfil en la paginas 165 y 166).

Perfil III-4, (PIII-4).- Sitio ubicado a unos 1,800 msnm, sobre las coordenadas geográficas  $18^{\circ} 56' 07''$  y  $99^{\circ} 19' 06''$ , pasando el poblado de Buenavista del Monte rumbo sur a unos 1.5 kilometros, con suelo completamente erosionado con cárcavas profundas, sin sostener una vegetación natural o inducida, en muchos de los casos, afloramiento del material endurecido (En el capítulo 12. Anexos, se tienen fotografías de esta zona y del perfil en la paginas 167, 168 y 169).



7.2.1.3. Con fundamento en la determinación de horizontes y materiales endurecidos del manual 18, USDA, (1994), fueron descritos los perfiles de los suelos, obteniéndose 18 muestras recolectadas de los horizontes, subhorizontes y materiales endurecidos de los 4 perfiles seleccionados.

7.2.1.4. Con el fin de conocer las respuestas del suelo y de la capa cementada a otras pruebas hidráulicas, se determinó en campo la infiltración. Los valores de la misma fueron obtenidos por la técnica de los cilindros concéntricos y calculados con la ecuación de Kostyakov (1932).

7.2.1.5. Se procedió a obtener núcleos de suelos inalterados para someterlos a las pruebas de resistencias a la compresión no confinada y medir la resistencia de las capas no endurecidas.

7.2.1.6. Se realizó un levantamiento de campo de las características morfogenéticas de los perfiles, así como datos del medio físico como la topografía, pendiente, grado de perturbación, actividad agrícola y vegetación dominante. También se recolectaron muestra de la vegetación nativa para su mejor identificación.

7.2.1.7. Se determinó la consistencia, películas de arcillas y separación de horizontes utilizadas para la clasificación morfológica de campo, fueron hechas con base en el Soil Survey Staff (1984). Mediante el sistema de clasificación morfológica de campo (Bilzi y Ciolkosz, 1977) se determinó:

- ◆ .-El desarrollo relativo de horizontes por comparación de dos horizontes adyacentes.
- ◆ .- El desarrollo relativo del perfil por comparación de cada horizonte con la capa cementada.

### **7.3. Análisis de laboratorio.**

Las muestras recolectadas tanto del suelo como de los materiales endurecidos fueron secadas al aire en el invernadero a temperatura ambiente. Ya secas se procedió a su trituración con mortero de madera y se tamizaron con mallas del número 2 mm.

Los análisis físicos y químicos de las muestras colectada de los suelos y las capas endurecidas se le realizaron conforme la metodología de USDA-Soil Survey Staff(1988).

#### **7.3.1. Análisis Físicos.**

- ☆ Color en seco y en húmedo. Se determino por medio de la tabla de Munsell(1990).
- ☆ Textura. Realizada por el método de Bouyoucos (1963). Modificado por Villegas y colaboradores, (1978).
- ☆ Densidad real. Por el método del terrón de parafina de acuerdo con Black, (1965).
- ☆ Densidad aparente. Por el método del pignometro (Baver, 1980).

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

- ☆ Porosidad total del suelo. Atraves de la densidad real y la densidad aparente.
- ☆ Distribución del tamaño de las partículas. La distribución del tamaño de partículas que permitió conocer las proporciones granulométricas se realizó por el método de Day (1965).
- ☆ Esfericidad y redondez de las partículas. Para poder explicar el modo y el medio de transporte de las partículas se estudió la esfericidad y redondez de la misma por la escala de Powers (1963). En la fracción  $\leq$  de 0.1 mm.
- ☆ Espacio poroso. Con base el Johnson y colaboradores (1960) se caracterizó el estado poroso considerando la abundancia el diámetro de poros, la continuidad, la distribución y la morfología; el estudio se hizo en varios pedos representativos de cada horizonte, examinados en un microscopio binocular a x 45.
- ☆ La resistencia a la compresión no confinada. Permitted medir la resistencia al corte de estos materiales se determinó en núcleos labrados, sujetos a un esfuerzo creciente en un marco de carga.
- ☆ Las pruebas de límite líquido, de límite plástico y de resistencia relativa fueron hechas de acuerdo Head (1984).
- ☆ Los pretratamientos para eliminar agregantes y estudiar los granos minerales, tal como fueron sedimentados, estuvieron basados en Kunse (1965).
- ☆ Para determinar la estabilidad de las capas cementadas dentro del agua, se utilizó fragmentos del tamaño de un puño (USDA 1988) mismos que fueron

depositados independientemente en un litro de agua destilada de pH=7 y a 21°C. Las muestras, además, fueron sometidas a tratamientos alternos con ácido clorhídrico 1 N e hidróxido de potasio concentrado, para evaluar su estabilidad.

### **7.3.2. Análisis Químico.**

- ⊗ Los cationes intercambiables. Se realizaron mediante la técnica de  $\text{NH}_4\text{Oc}$ , pH7 (Jackson, 1970).  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  fueron determinados por la titulación de EDTA. El  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  por flamometría, en un flamómetro Corning modelo 400.
- ⊗ La materia orgánica. Se cuantificó por medio del método de Walkley y Black (1947).
- ⊗ Potencial hidrógeno ( pH). El pH fue determinado en un potenciómetro marca Corning modelo 10 en una dilución en agua 1 : 2.5.
- ⊗ Capacidad de intercambio catiónico total. Fueron determinados por el método de  $\text{NH}_4\text{Oc}$ , pH 8.2 (USDA 1994).
- ⊗ El aluminio intercambiable. Se cuantificó por el método de Coleman y colaboradores (1959).
- ⊗ Nitrógeno total. Por el método de digestión de Kjeldahl (Jackson, 1970).
- ⊗ La meteorización de los suelos con capas cementadas fue estudiada mediante el análisis químico total, expresado en óxidos totales entre la roca basal y los horizontes meteorizados, para ello se aplicó la constante de aluminio (Krauskopf, 1979), la determinación de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  libres, que indica el nivel de alteración de un suelo y su participación en la

cementación, se basó en Hashimoto y Jackson (1960).

- ⊙ Análisis del cementante. Las muestras fueron observadas en un microscopio electrónico de barrido; la preparación de las muestras consistió en hacer láminas delgadas pulidas, posteriormente cubiertas con una capa de oro ionizado. Los análisis químicos fueron efectuados con un equipo de energía dispersiva de rayos X.

### **7.3.3. Análisis Mineralógico.**

- ◇ La segregación de las arcillas. Por medio del método de hexametafosfato de sodio y oxalato de sodio (Jackson, 1970).
- ◇ Mineralogía de arcillas. Por difracción de rayos X, se usó un generador Phillips PW 1130/96 con radiación de cobre  $k\alpha$ , monocromador de grafito, filtro de vanadio y condiciones de excitación de 30 kv y 20 mA.

Obtenidos los resultados se procedió a su ordenación y clasificación para realizar su procesamiento y proceder al análisis y discusión considerando los principios básicos establecidos por las diferentes clasificaciones de suelos, principalmente la generada por la FAO/UNESCO(1994) y Soil Taxonomy (1994).

## **8. RESULTADOS Y DISCUSION.**

### **8.1. Teledetección.**

El análisis y la interpretación de las imágenes LANDSAT 3 y de las fotografías aéreas permitieron establecer patrones espectrales muy diagnósticos para las capas endurecidas [ cementadas (duripanes) o compactadas (fragipanes) ] que afloran en el área de estudio. Los límites de la distribución espacial de las capas endurecidas de ambos materiales resultaron evidentes, tanto en la imagen en falso color como en las bandas MSS6 Y MSS7.

La confrontación entre la visión de campo y su imagen espectral demostró que puede deducirse, en esta zona, la presencia de capas endurecidas a través de esta técnica, con una confianza porcentual mayor que el 85. Mediante su aplicación se pudo determinar las zonas de estudio.

### **8.2. Clasificación morfológica de campo.**

En la tabla 2, se exponen las propiedades morfológicas de los suelos estudiados y en la tabla 3, la clasificación morfológica de campo para estimar el desarrollo relativo de horizontes( DRH) y el desarrollo relativo del perfil (DRP). Tales desarrollos fueron usados como una medida cualitativa para estimar los cambios morfológicos que han tenido lugar entre los horizontes y entre éstos y el material parental.

#### **8.2.1. Desarrollo relativo de horizontes (DRH).**

En la tabla 2, se observa que el perfil III-1 tiene valores que resultan de la comparación de los horizontes A/B11, siendo debido al color, textura, estructura y consistencia. En el límite B11/B12, por diferencia en color, estructura y de la presencia de películas de arcilla. En cuanto a los horizontes B12/Bt21 no se cuantificó ninguna diferencia en sus propiedades morfológicas. En Bt21/Bt22 solo existió diferenciación en la estructura.

Tabla 2 . Propiedades morfológicas de los perfiles estudiados

| PERFIL | HZ              | COLOR<br>1/         | TEXTURA | ESTRUCTURA  | CONSISTENCIA | PELICULAS<br>DE ARCILLA | SEPARACION |
|--------|-----------------|---------------------|---------|-------------|--------------|-------------------------|------------|
| III.-1 | A               | 7.5YR5/6<br>5YR3/3  | Cr      | bsa, g, d   | l<br>fr      | b                       | gradual    |
|        | B11             | 7.5YR5/8<br>5YR4/4  | R       | bsa, me, mo | d<br>fm      | b                       | difusa     |
|        | B12             | 7.5YR5/6<br>5YR3/4  | R       | mi, me, mo  | d<br>fm      | cn,de,ho                | difusa     |
|        | Bt21            | 7.5YR5/6<br>5YR3/4  | R       | mi, me, mo  | d<br>fm      | cn,de,ho                | difusa     |
|        | Bt22            | 7.5YR5/6<br>5YR3/4  | R       | mi, g, fu   | d<br>fm      | cn,de,ho                | difusa     |
|        | BC              | 7.5YR5/8<br>5YR3/4  | CrI     | mi, g, fu   | ld<br>fr     | cn,de,ho                | difusa     |
|        | Cx              | 10YR7/6<br>10YR5/6  | R       | m           | md<br>mfm    | b                       | difusa     |
| III.-2 | O               | 10YR7/6<br>7.5YR4/4 | L       | b           | su<br>fr     | b                       | clara      |
|        | A11             | 10YR7/6<br>7.5YR4/4 | Cl      | bsa, g, d   | su<br>fr     | b                       | difusa     |
|        | A12             | 10YR7/6<br>7.5YR4/4 | Cl      | bsa, g, d   | su<br>fr     | b                       | difusa     |
|        | Bt <sub>b</sub> | 10YR8/6<br>7.5YR5/6 | R       | mi, me, fu  | ld<br>fm     | cn,de,ho                | difusa     |
|        | BC <sub>b</sub> | 10YR8/6<br>7.5YR5/6 | CrI     | mi, me, mo  | d<br>mfm     | b                       | difusa     |
|        | Cx <sub>b</sub> | 10YR8/3<br>10YR7/6  | CrI     | m           | d<br>fm      | b                       | clara      |

\_1/.-En primer termino aparece la determinación en seco, en segundo en húmedo.

b=no presenta; Cr=franco arcillosa; bsa=bloques subangulares; g=gruesa; d=debil; l=ligera; ld=ligeramente dura; R=arcilla; me=media; mo=moderada; d=dura; md= muy dura; fm=firme; mi=migajosa; cn=continua; de=delgada; su=suave; Cl=franco limosa; CrI=migajon arcilloso limoso; RI=arcilla limosa; ba=bloques angulares; Ca=franco arenoso; mfm=muy firme; fu=fuerte; ho=horizontal. m=masiva; L=limosa; fr=friable.

Tabla 2 . Propiedades morfológicas de los perfiles estudiados(continuación).

| PERFIL | HZ   | COLOR<br>1/          | TEXTURA | ESTRUCTURA | CONSISTE-<br>NCIA | PELICULAS<br>DE ARCILLA | SEPARACION |
|--------|------|----------------------|---------|------------|-------------------|-------------------------|------------|
| III-3  | A    | 10YR5/4<br>10YR4/4   | RI      | bsa, g, d  | l<br>fr           | b                       | clara      |
|        | Bt21 | 10YR5/4<br>10YR3/3   | R       | ba, me, mo | l<br>fr           | cn,de,ho                | clara      |
|        | Bt22 | 7.5YR4/4<br>10YR4/3  | R       | ba, me, fu | d<br>fm           | cn,de,ho                | clara      |
|        | Cqm  | 7.5YR5/4<br>7.5YR4/4 | R       | m          | md<br>mfm         | b                       | clara      |
|        | C    | 10YR5/4<br>10YR4/4   | Cr      | m          | md<br>mfm         | b                       | clara      |
| III-4  | A    | 10YR3/4<br>10YR3/2   | Ca      | bsa, me, d | l<br>su           | b                       | difusa     |
|        | Bw   | 10YR7/3<br>10YR3/3   | Cra     | ba, me, mo | l<br>su           | cn,de, ho               | clara      |
|        | Cqm  | 10YR7/3<br>10YR5/4   | Cra     | m          | md<br>mfm         | b                       | clara      |
|        | C    | 10YR5/4<br>10YR4/4   | Ca      | m          | md<br>mfm         | b                       | clara      |

\_1/.-En primer termino aparece la determinación en seco, en segundo en húmedo.

b=no presenta; Cr=franco arcillosa; bsa=bloques subangulares; g=gruesa; d=debil; l=ligera; ld=ligeramente dura; R=arcilla; me=media; mo=moderada; d=dura; md= muy dura; fm=firme; mi=migajosa; cn=continua; de=delgada; su=suave; Cl=franco limosa; Crl=migajon arcilloso limoso; RI=arcilla limosa; ba=bloques angulares; Ca=franco arenoso; mfm=muy firme; fu=fuerte; ho=horizontal. m=masiva; L=limosa; fr=friable.



Tabla 3. Clasificación morfológica de campo.

| PERFIL | HORIZONTE                         | DRH | HORIZONTE                         | DRP |
|--------|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| III-1  | A/B11                             | 10  | A/Cx                              | 15  |
|        | B11/B12                           | 10  | B11/Cx                            | 14  |
|        | B12/Bt21                          | 0   | B12/Cx                            | 19  |
|        | Bt21/Bt22                         | 3   | Bt21/Cx                           | 19  |
|        | Bt22/BC                           | 9   | Bt22/Cx                           | 19  |
|        | BC/Cx                             | 24  | BC/Cx                             | 24  |
| III-2  | O/A11                             | 7   | O/Cx <sub>b</sub>                 | 16  |
|        | A11/A12                           | 2   | A11/Cx <sub>b</sub>               | 20  |
|        | A12/Bt2 <sub>b</sub>              | 17  | A12/Cx <sub>b</sub>               | 20  |
|        | Bt2 <sub>b</sub> /BC <sub>b</sub> | 11  | Bt2 <sub>b</sub> /Cx <sub>b</sub> | 22  |
|        | BC <sub>b</sub> /Cx <sub>b</sub>  | 14  | BC <sub>b</sub> /Cx <sub>b</sub>  | 14  |
| III-3  | A/B21                             | 9   | A/C                               | 8   |
|        | Bt21/Bt22                         | 8   | Bt21/C                            | 11  |
|        | Bt22/Cqm                          | 9   | Bt22/C                            | 12  |
|        | Cqm/C                             | 9   | Cqm/C                             | 9   |
| III-4  | A/Bw                              | 16  | A/C                               | 11  |
|        | Bw/Cqm                            | 14  | Bw/C                              | 18  |
|        | Cqm/C                             | 8   | Cqm/C                             | 8   |

En los horizontes Bt22/BC se dio diferenciación en color, textura y consistencia. En BC/Cx, se dio la más alta diferenciación en color, textura, estructura, consistencia y películas de arcilla.

Perfil III-2.- El valor de DRH para O/A11 se debió fundamentalmente a la textura y estructura. En la comparación de los horizontes A11/A12 solamente existió una mínima diferenciación. Para A12/Bt2<sub>b</sub>, los valores fueron en color, textura, estructura, consistencia y películas de arcilla. En Bt2<sub>b</sub>/BC<sub>b</sub>, en textura, estructura, consistencia y no presentando el horizonte inferior películas de arcilla. Los valores de BC<sub>b</sub>/Cx<sub>b</sub>, se dieron por las diferencias en color en húmedo, estructura y consistencia.

En la continuación de la tabla 2, se tiene el perfil III-3, donde los valores que resultaron de la comparación de los horizontes fueron los siguientes: para los horizontes A/Bt21 fue debido al color en húmedo, textura, estructura y presencia de películas de arcilla en el horizonte inferior. En el límite Bt21/Bt22, por diferencia en color en seco y húmedo y consistencia. En cuanto a los horizontes Bt22/Cqm fue en color en seco y húmedo, estructura y consistencia. En los horizontes Cqm/C, se dio diferenciación en color en seco y húmedo y textura, ambos horizontes no presentaron películas de arcilla.

En el perfil III-4, en A/Bw, fue debido al los colores en seco y húmedo, textura, estructura y a la presencia de películas de arcillas en el horizonte inferior. En Bw/Cqm, se debió al color en húmedo, estructura, consistencia y a la ausencia de películas de arcilla en el horizonte inferior. Para Cqm/C, la diferenciación fue fundamentalmente por los colores en seco y húmedo.

En la figura 21, se demuestra gráficamente los valores de desarrollo relativo de horizontes obtenidos de los cuatro perfiles estudiados, destacando el PIII-1 por la presentación de varios horizontes que le componen (Capítulo 12. Anexos, material fotográfico PIII-1, paginas 162 y 164 ) así como , el desarrollo de los horizontes a mayor profundidad. El la coloración rojiza de la textura habla de un suelos desarrollado.

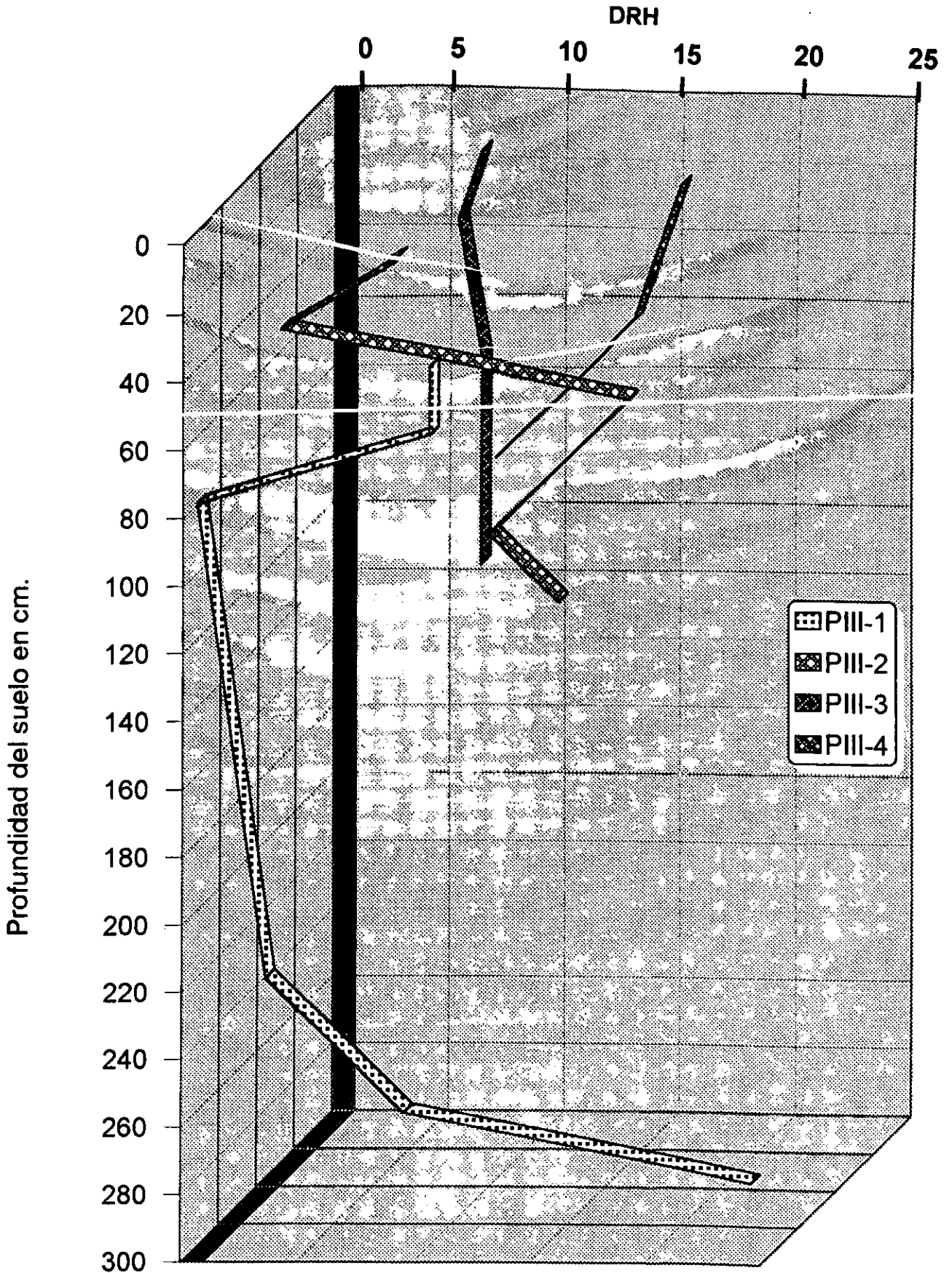


Figura 21. Desarrollo Relativo de Horizontes

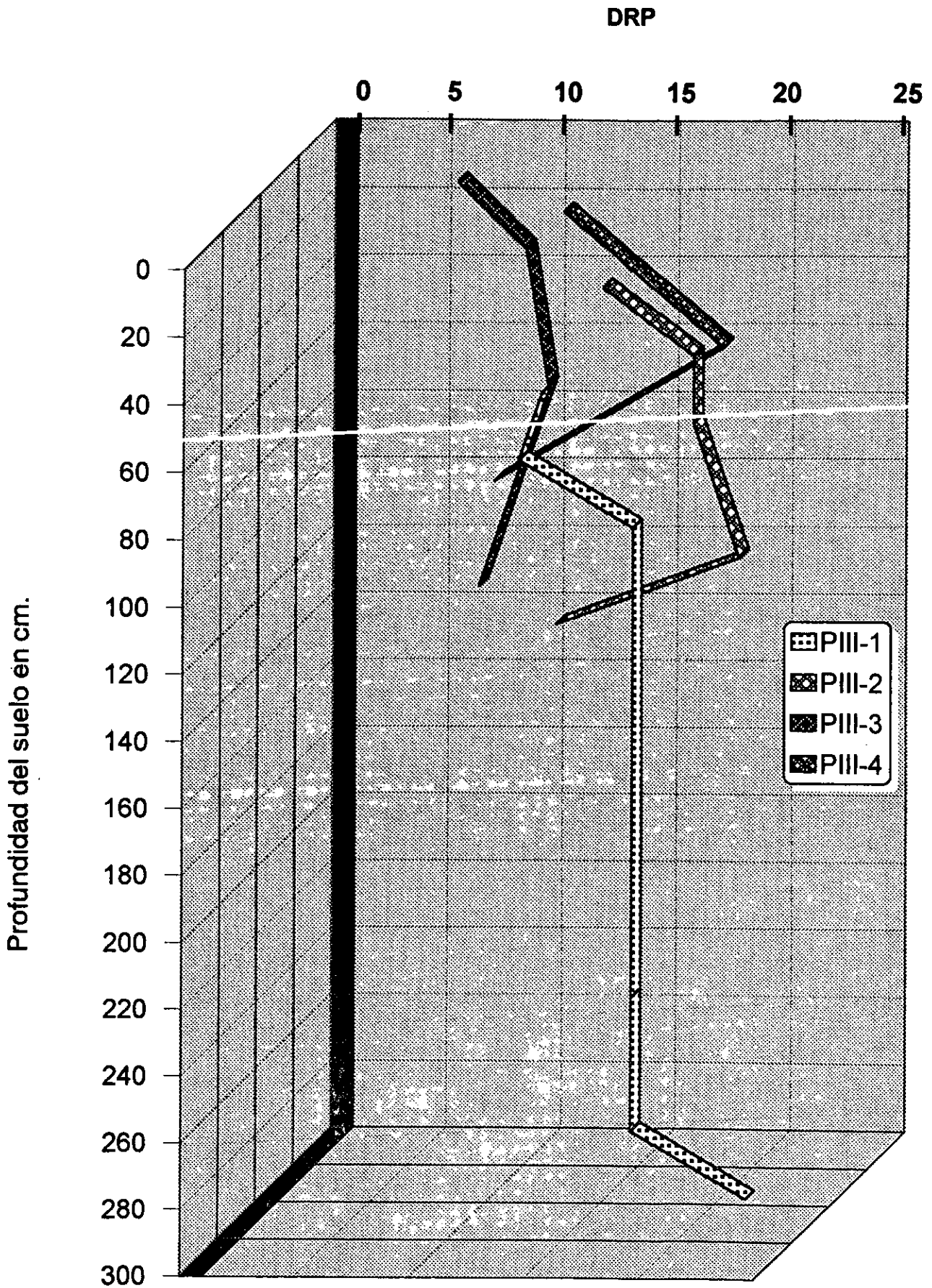


Figura 22. Desarrollo Relativo de Perfiles

### **8.2.2. Desarrollo relativo del perfil (DRP).**

En la tabla 3, se tienen los valores de desarrollo relativo de los perfiles en estudio, los valores más altos reportados fueron los de la parte media de los perfiles, indicativo que estos suelos tienen o están desarrollando en la mayoría de los casos un horizonte B, que demuestra que son suelos que están en proceso de pardificación y tienen un lavado de bases. En la figura 22, se pudo observar los valores representativos de los perfiles, destacando el mayor desarrollo del PIII-1 y del PIII-2.

De acuerdo a Meixner y Singer, (1981), los suelos jóvenes, no diferenciados deben tener valores de desarrollo relativo de horizontes (DRH) menores de 10 y los suelos viejos, bien diferenciados valores mayores de 10. En el presente trabajo se encontraron valores medios entre 9 y 10, seis números arriba de 10 y seis números abajo de 10 que nos indica que son suelos medianamente desarrollados (Tabla 3).

## **8.3. Propiedades diagnósticas principales.**

### **8.3.1. Propiedades físicas.**

#### **8.3.1.1. Distribución del tamaño de las partículas.**

En la tabla 4, se presentan los resultados del análisis granulométrico en los perfiles estudiados. Los contenidos de arcilla en el perfil III-1, aumentaron sobre el fragipán, disminuyendo ligeramente en éste pero con significativa presencia; sin embargo, todos los horizontes presentaron valores altos, más del 30%, con la existencia de un horizonte BC sobre el fragipán (Cx) cementado por sílice. En este perfil el contenido de limo fue mayor que el de las arenas, y en mayor cantidad que los limos gruesos y medios.

La existencia de arena gruesa fue casi nula, correspondiendo los altos valores a las arenas muy finas. En este suelo predominaron las texturas arcillosas, confirmándose con las películas de arcillas presentadas en las propiedades morfológicas de campo sobre todo en los horizontes medios-inferiores.

En el perfil III-2, las texturas dominantes en los horizontes fueron los migajones limosos y en menor proporción los migajones arcillo limosos, de tal manera que los limos fueron los dominantes en este suelo, presentando valores sobre 30% y hasta 81%. Se nota la presencia significativa de arcilla en los horizontes inferiores, así como la acumulación de este mineral en el horizonte con fragipán (Cx<sub>b</sub>), demostrando que existe iluviación de arcilla de los horizontes superiores a los inferiores (Tabla 4. ).

El horizonte Bt<sub>2b</sub>, presentó películas de arcilla en la clasificación morfológica de campo, correspondiendo a los valores más altos en contenidos de arcilla en este perfil. Las arenas se presentaron en intervalos de 1.74 a 19.8%, siendo significativa su presencia en las parte superiores del perfil, dominando las arenas muy finas, cabe señalar que la presencia de arenas gruesas no fue significativa.

En la tabla 4 (Continuación), para el perfil III-3, las texturas arcillosas dominaron en todos los horizontes del perfil, manifestándose principalmente en la parte media, donde los valores de la arcilla se establecieron desde 56% hasta los 74%, en el intervalo de profundidad de 10-42 cm. Es de señalarse que en los límites inferiores de este intervalo, se dio la presencia del duripán (Cqm), en las parte superior de este intervalo, los valores de arcilla, correspondieron con la presencia de películas de arcilla de la descripción morfológica de campo. Después de las arcillas, los limos tuvieron los valores más altos que oscilaron desde 14% hasta 43%. En las partículas de arena, las arenas finas presentaron los valores más altos, no siendo significativa la presencia de las arenas muy gruesas.

En la misma tabla 4 (Continuación), la distribución del tamaño de partículas en el perfil III-4, los valores de las arenas fueron los más altos en todos los horizontes del suelo, desde 47% hasta 66%, dominando ligeramente las partículas de arena fina y muy fina, la presencia de las arenas de media a gruesa es significativa, existió una ligera presencia de arena gruesa. Los limos existieron en valores similares en todos los horizontes. La arcilla presenta valores que varían desde 11% hasta 28%, correspondiendo el valor más alto con la presencia de películas de arcillas identificada en las propiedades morfológicas de campo.

Tabla 4. DISTRIBUCCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS(mm)  
 PORCENTAJE DE PARTICULAS MENORES DE 2 mm

| PERFIL | HZ              | PROF.   | A R E N A S |        |          |           |           | TOTAL | L I M C S |            |             | TOTAL ARCILLA | CLASIFICACION TEXTURAL |                        |
|--------|-----------------|---------|-------------|--------|----------|-----------|-----------|-------|-----------|------------|-------------|---------------|------------------------|------------------------|
|        |                 |         | m.gruesa    | gruesa | media    | fina      | m. fina   |       | grueso    | medio      | fino        |               |                        |                        |
|        |                 |         | 2-1         | 1-0.5  | 0.5-0.25 | 0.25-0.10 | 0.10-0.05 |       | 0.05-0.02 | 0.02-0.002 | 0.005-0.002 |               |                        | < 0.002                |
| III-1  | A               | 0-35    | 0.13        | 0.95   | 4.80     | 10.80     | 18.07     | 34.75 | 25.10     | 4.22       | 5.25        | 34.57         | 30.68                  | Franco Arcilloso       |
|        | B11             | 35-54   | 0.00        | 0.27   | 2.16     | 8.45      | 2.18      | 13.06 | 6.99      | 9.25       | 0.95        | 17.19         | 69.75                  | Arcilla                |
|        | B12             | 54-85   | 0.00        | 0.02   | 3.27     | 2.99      | 1.40      | 7.68  | 11.94     | 3.74       | 4.52        | 20.20         | 72.15                  | Arcilla                |
|        | Bt21            | 85-210  | 0.00        | 0.18   | 2.20     | 4.50      | 1.22      | 8.10  | 13.37     | 1.79       | 4.52        | 19.68         | 72.22                  | Arcilla                |
|        | Bt22            | 210-270 | 0.00        | 0.85   | 3.24     | 3.00      | 2.09      | 9.18  | 9.52      | 2.31       | 5.12        | 16.95         | 73.87                  | Arcilla                |
|        | BC              | 270-285 | 0.00        | 0.15   | 2.66     | 1.28      | 6.02      | 10.11 | 7.44      | 12.65      | 33.90       | 53.99         | 35.90                  | Migajon Arcillo Limoso |
|        | Cx              | 285-+   | 0.30        | 4.69   | 4.80     | 6.39      | 7.21      | 23.39 | 9.36      | 13.38      | 9.12        | 31.86         | 44.75                  | Arcilla                |
| III-2  | O               | 0-10    | 0.00        | 0.53   | 0.70     | 2.30      | 6.70      | 10.23 | 29.93     | 10.09      | 40.94       | 80.96         | 8.81                   | Limo                   |
|        | A11             | 10-26   | 0.00        | 0.09   | 2.10     | 3.27      | 5.62      | 11.08 | 56.58     | 18.76      | 0.25        | 75.59         | 13.33                  | Migajon limoso         |
|        | A12             | 26-42   | 0.00        | 0.87   | 2.27     | 3.95      | 6.38      | 13.47 | 10.18     | 49.38      | 6.58        | 66.14         | 20.39                  | Migajon limoso         |
|        | Bt <sub>b</sub> | 42-90   | 0.04        | 0.55   | 1.01     | 3.11      | 3.39      | 8.10  | 12.03     | 13.53      | 7.72        | 33.28         | 58.62                  | Arcilla                |
|        | BC <sub>b</sub> | 90-125  | 0.00        | 0.00   | 0.12     | 0.71      | 0.91      | 1.74  | 24.69     | 18.72      | 20.78       | 64.19         | 34.07                  | Migajon Arcillo limoso |
|        | Cx <sub>b</sub> | 125-+   | 0.34        | 2.24   | 4.22     | 7.69      | 4.69      | 19.18 | 19.44     | 11.31      | 14.60       | 45.35         | 35.47                  | Migajon Arcillo limoso |

Tabla 4. DISTRIBUCCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS(mm)  
 PORCENTAJE DE PARTICULAS MENORES DE 2 mm  
 (continuación)

| PERFIL | HZ   | PROF.  | A R E N A S |        |          |           |           | TOTAL     | L I M O S  |             |         | TOTAL ARCILLA | CLASIFICACION TEXTURAL |                         |
|--------|------|--------|-------------|--------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|---------|---------------|------------------------|-------------------------|
|        |      |        | m.gruesa    | gruesa | media    | fina      | m. fina   | grueso    | medio      | fino        | < 0.002 |               |                        |                         |
|        |      |        | 2-1         | 1-0.5  | 0.5-0.25 | 0.25-0.10 | 0.10-0.05 | 0.05-0.02 | 0.02-0.005 | 0.005-0.002 | < 0.002 |               |                        |                         |
| III-3  | A    | 0-10   | 0.44        | 0.91   | 2.12     | 5.23      | 3.82      | 12.52     | 27.39      | 11.21       | 5.04    | 43.64         | 43.84                  | Arcilla Limosa          |
|        | Bt21 | 10-20  | 0.00        | 2.28   | 2.30     | 3.40      | 3.60      | 11.58     | 15.65      | 0.92        | 4.8     | 21.37         | 67.05                  | Arcilla                 |
|        | Bt22 | 20-28  | 0.00        | 2.51   | 2.50     | 3.50      | 3.50      | 12.01     | 5.14       | 5.9         | 3.2     | 14.24         | 73.75                  | Arcilla                 |
|        | Cqm  | 28-42  | 0.00        | 0.83   | 1.87     | 5.08      | 0.00      | 7.78      | 18.48      | 12.44       | 5.24    | 36.16         | 56.06                  | Arcilla                 |
|        | C    | 42-125 | 0.00        | 0.66   | 2.35     | 13.90     | 6.50      | 23.41     | 22.79      | 8.12        | 7.6     | 38.51         | 38.08                  | Migajon Arcilloso       |
| III-4  | A    | 0-15   | 0.06        | 7.06   | 12.52    | 18.53     | 18.33     | 56.50     | 24.91      | 7.18        | 0.41    | 32.50         | 11.00                  | Migajon Arenoso         |
|        | Bw   | 15-44  | 0.00        | 5.18   | 11.55    | 15.41     | 15.61     | 47.75     | 7          | 10.27       | 6.73    | 24.00         | 28.25                  | Migajon Arcillo Arenoso |
|        | Cqm  | 44-104 | 0.90        | 6.48   | 13.31    | 8.49      | 17.62     | 46.80     | 8.13       | 7.55        | 12.32   | 28.00         | 25.20                  | Migajon Arcillo Arenoso |
|        | C    | 104-+  | 0.70        | 13.18  | 15.32    | 17.30     | 19.50     | 66.00     | 6.18       | 10.51       | 3.81    | 20.50         | 13.50                  | Migajon Arenoso         |



### **8.3.1.2. Esfericidad y redondez de las partículas minerales.**

Se determinó en limo y arena muy fina, ya que son las fracciones que se originan directamente de los minerales primarios que constituyen el material parental. En la tabla 5, de propiedades físicas principales, se observa que todas las partículas manifestaron esfericidad baja en la mayoría de los horizontes de los perfiles estudiados.

En redondez, los valores en porcentaje obtenidos de los horizontes de los perfiles, demuestran la existencia de una baja esfericidad en la mayoría de los horizontes correspondiéndoles por lo general los porcentajes más altos. En este concepto, para el perfil III-1, es más marcada la existencia de granos con baja esfericidad y subangulares sobre todo en los horizontes superiores, en este perfil, se presentaron valores de alta esfericidad y baja esfericidad angulares, subangulares y subredondeados.

En el perfil III-2, los porcentajes de redondez fueron más equitativos, con un ligero incremento de los valores subangulares existiendo además porcentajes angulares y subredondeados, combinados con alta esfericidad y baja esfericidad.

Para los perfiles III-3, y 4, la distribución de los porcentajes de redondez fueron más uniformes dándose la existencia de valores angulares, subangulares, no existiendo los porcentajes para los subredondeados, y cifras de alta esfericidad y baja esfericidad. La distribución de los valores presentados de redondez y esfericidad en los diferentes perfiles estudiados correspondieron al perfil III-1 la mayor cantidad de variantes de valores, presentando hasta 5 y 6 valores diferentes por horizonte, el perfil III-4, presento menor variabilidad de valores de redondez y esfericidad.

Al analizar las partículas en el microscopio, de la forma que fueron recolectadas en el campo, se mostraron valores altos de esfericidad y redondez, lo que es indicativo de precipitación y agregación más que abrasión. Cuando fueron aplicados los pretratamientos y eliminados los agregantes, se observó la forma en que se depositaron con poca o ninguna abrasión. Se considera que la esfericidad

y redondez de los granos son consecuencia del medio y modo de transporte. Con base en la evidencia de la existencia de una mayor cantidad de partículas con baja esfericidad y redondez subangular y angular, se considera que estos granos deben su forma a los depósitos *in situ* (tefra), y secundariamente, a cierto transporte eólico, aluvial o coluvial, y procesos de alteración moderada.

#### **8.3.1.3. Densidad aparente, densidad real y porosidad total.**

En la misma tabla 5, de propiedades físicas principales, se puede observar las densidades presentadas en cada uno de los horizontes de los perfiles de los suelos, así como de las capas endurecidas, manifestándose los valores más altos de densidad aparente a mayor profundidad del suelo y sobre todo, donde aparecen las capas endurecidas sean estas duripán o fragipán.

Es observable que en los cuatro perfiles la densidad real en estos casos, a medida que se profundiza tiende a incrementarse con ligeras excepciones en los perfiles III-1, 2 y 3. Los valores más altos de densidad aparente y densidad real se obtuvieron en los fragipanes y en los duripanes, siendo el perfil III-2 quien registró valores mayores en estos conceptos.

Los valores de porosidad total disminuyeron considerablemente a medida que se profundizó en los cuatro perfiles, esto se deduce por el incremento de los valores de densidad real que presentaron las partículas de los suelos, originadas principalmente por el incremento de los minerales primarios (arenas y limos). Cabe señalar que los valores más bajos de porosidad total coincidieron con los horizontes que tuvieron la presencia de capas endurecidas. Correspondiendo los valores más bajos al fragipán del perfil III-2 y al duripán del perfil III-3, los valores más altos en la densidad aparente fueron para ambos perfiles.

#### **8.3.1.4. Caracterización del espacio poroso.**

El estudio de los poros que se demuestra en la tabla 6 y su continuación, permitió conocer los niveles de iluviación y el grado de obstrucción de los mismos en suelo

Tabla 5 . Propiedades físicas principales.

| PERFIL | HZ              | PROF.<br>cm | Redondez y esfericidad<br>en limo y arena muy fina (%) |         |          |          |          |          | Densidad<br>en<br>g/cm <sup>3</sup> |      | Porosidad<br>total |
|--------|-----------------|-------------|--|---------|----------|----------|----------|----------|-------------------------------------|------|--------------------|
|        |                 |             | A<br>AE  | A<br>BE | SA<br>AE | SA<br>BE | SR<br>AE | SR<br>BE | DA                                  | DR   | PT                 |
| III-1  | A               | 0-35        | 5  | 15      | 20       | 60       |          |          | 1.16                                | 2.01 | 43                 |
|        | B11             | 35-54       |  | 20      | 30       | 50       |          |          | 1.26                                | 2.15 | 42                 |
|        | B12             | 54-85       | 3  | 25      | 20       | 35       | 17       |          | 1.27                                | 2.00 | 37                 |
|        | Bt21            | 85-210      |  | 18      | 16       | 40       | 20       | 6        | 1.31                                | 2.16 | 40                 |
|        | Bt22            | 210-270     |  | 27      | 28       | 25       | 18       | 2        | 1.46                                | 2.18 | 34                 |
|        | BC              | 270-285     | 6  | 19      | 24       | 32       | 15       | 4        | 1.48                                | 2.20 | 28                 |
|        | Cx              | 285-+       | 9  | 30      | 22       | 39       |          |          | 1.59                                | 2.15 | 26                 |
| III-2  | O               | 0-10        |  | 28      | 40       | 32       |          |          | 1.15                                | 2.15 | 47                 |
|        | A11             | 10-26       |  | 23      | 22       | 40       | 15       |          | 1.18                                | 2.20 | 47                 |
|        | A12             | 26-42       |  | 24      | 25       | 50       | 26       |          | 1.20                                | 2.22 | 46                 |
|        | Bt <sub>b</sub> | 42-90       |  | 28      | 30       | 25       | 13       | 4        | 1.60                                | 2.30 | 31                 |
|        | BC <sub>b</sub> | 90-125      | 5  | 22      | 25       | 23       | 25       |          | 1.67                                | 2.20 | 25                 |
|        | Cx <sub>b</sub> | 125-+       | 10   | 28      | 30       | 32       |          |          | 1.85                                | 2.35 | 22                 |
| III-3  | A               | 0-10        | 2  | 27      | 22       | 30       | 19       |          | 1.20                                | 2.00 | 40                 |
|        | Bt21            | 10-20       |  | 20      | 38       | 32       | 10       |          | 1.22                                | 2.00 | 39                 |
|        | Bt22            | 20-28       |  | 30      | 36       | 28       | 6        |          | 1.30                                | 2.15 | 40                 |
|        | Cqm             | 28-42       | 12   | 18      | 25       | 20       | 25       |          | 1.82                                | 2.18 | 17                 |
|        | C               | 42-125      | 10   | 15      | 32       | 26       | 10       |          | 1.82                                | 2.15 | 17                 |
| III-4  | A               | 0-15        |  | 30      | 36       | 34       |          |          | 1.20                                | 2.08 | 43                 |
|        | Bw              | 15-44       |  | 23      | 27       | 32       | 18       |          | 1.25                                | 2.16 | 43                 |
|        | Cqm             | 44-104      | 8  | 26      | 40       | 22       | 4        |          | 1.82                                | 2.21 | 18                 |
|        | C               | 104-+       | 9  | 27      | 38       | 20       | 6        |          | 1.81                                | 2.30 | 22                 |

A=angular, AE=alta esfericidad, BE=baja esfericidad, SA=subangular, SR=subredondeado, DA=densidad aparente  
DR=densidad real, PT=porosidad total.

y en las capas endurecidas. En las tablas 6 y su continuidad, se describe la clasificación del espacio poroso. En todos los horizontes que yacen sobre las capas endurecidas (fragipán o duripán), los espacios porosos manifestaron características similares: mucho poros, más de 200 por  $\text{dm}^2$ , diámetro dominante de microporos.

En la tabla 6, en el perfil III-1, en los primeros horizontes se mostró un marcado dominio de los poros muy finos y de la mitad hacia abajo una mayor presencia de los microporos en todos los horizontes, más de 200 / $\text{dm}^2$ , continuos y de distribución imped con morfología intersticial con modificadores abiertos.

Para el perfil III-2, se dio una abundancia de espacio poroso, siendo muchos más de 200 / $\text{dm}^2$  y dominando en los 26 centímetros de profundidad los poros muy finos y en los horizontes inferiores el 100% de microporos, en ambos casos fueron continuos, con distribución imped y morfología intersticial con modificadores abiertos (Tabla 6).

En la tabla 6 (continuación), en el perfil III-3, se dio una abundancia de mucho espacio poroso más de 200 / $\text{dm}^2$  con una clara dominancia de existencia de microporos en todos los horizontes, siendo más marcada en la parte de la capa endurecida es decir a los 42-125 cm de profundidad, en todos los horizontes el espacio poroso demostró continuidad con distribución imped y de morfología intersticial con modificadores abiertos.

Para el perfil III-4, aunque existió mucha abundancia de espacio poroso, más de 200 / $\text{dm}^2$  en los primeros 44 cm de profundidad, existió una dominancia de macroporos mayor del 60% del espacio poroso. En los horizontes inferiores, el dominio fue de los microporos hasta la capa endurecida. En todo los horizontes del perfil, el espacio poroso se demostró continuo con distribución imped y de morfología intersticial con modificadores abiertos (Tabla 6, continuación).

En las capas endurecidas se demuestra la existencia de una reducción del diámetro de los poros en comparación a los horizontes superiores, lo que conlleva

Tabla 6. Clasificación del espacio poroso.

| PERFIL | HZ               | PROF.<br>cm | Abundancia                      | Diametro<br>(mm)                | Continuidad | Distribución | Morfología   | Modificadores |
|--------|------------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| III-1  | A                | 0-35        | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 32% Microporos<br>68% Muy Finos | Continuos   | Imped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | B11              | 35-54       | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 33% Microporos<br>67% Muy Finos | Continuos   | Imped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | B12              | 54-85       | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 40% Microporos<br>60% Muy Finos | Continuos   | Imped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | Bt21             | 85-210      | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 53% Microporos<br>47% Muy Finos | Continuos   | Imped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | Bt22             | 210-270     | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 64% Microporos<br>36% Muy Finos | Continuos   | Imped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | BC               | 270-285     | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 71% Microporos<br>29% Muy Finos | Continuos   | Imped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | Cx               | 285-+       | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 76% Microporos<br>24% Muy Finos | Continuos   | Imped        | Intersticial | Abiertos      |
| III-2  | O                | 0-10        | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 31% Microporos<br>69% Muy Finos | Continuos   | Imped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | A11              | 10-26       | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 42% Microporos<br>58% Muy Finos | Continuos   | Imped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | A12              | 26-42       | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 100% Microporos                 | Continuos   | Imped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | Bt2 <sub>b</sub> | 42-90       | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 100% Microporos                 | Continuos   | Imped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | BC <sub>b</sub>  | 90-125      | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 100% Microporos                 | Continuos   | Imped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | Cx <sub>b</sub>  | 125-+       | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 100% Microporos                 | Continuos   | Imped        | Intersticial | Abiertos      |

Tabla 6. Clasificación del espacio poroso(continuación).

| PERFIL | HZ   | PROF.<br>cm | Abundancia                      | Diametro<br>(mm)                 | Continuidad | Distribución | Morfología   | Modificadores |
|--------|------|-------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| III-3  | A    | 0-10        | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 56% Microporos<br>44% Muy Finos  | Continuos   | Irped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | Bt21 | 10-20       | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 78% Microporos<br>22% Muy Finos  | Continuos   | Irped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | Bt22 | 20-28       | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 78% Microporos<br>22% Muy Finos  | Continuos   | Irped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | Cqm  | 28-42       | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 78% Microporos<br>22% Muy Finos  | Continuos   | Irped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | C    | 42-125      | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 83% Microporos<br>17% Muy Finos  | Continuos   | Irped        | Intersticial | Abiertos      |
| III-4  | A    | 0-15        | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 25% Microporos<br>75% Macroporos | Continuos   | Irped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | Bw   | 15-44       | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 40% Microporos<br>60% Macroporos | Continuos   | Irped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | Cqm  | 44-104      | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 100% Microporos                  | Continuos   | Irped        | Intersticial | Abiertos      |
|        | C    | 104-+       | Muchos<br>+ 200/dm <sup>2</sup> | 96% Microporos<br>4% Macroporos  | Continuos   | Irped        | Intersticial | Abiertos      |

a estimar una infiltración baja, así como el llenado de los microporos por material iluvial y por otra parte a la ausencia de raíces en los fragipanes y duripanes.

#### **8.3.1.5. Resistencia a la compresión no confinada.**

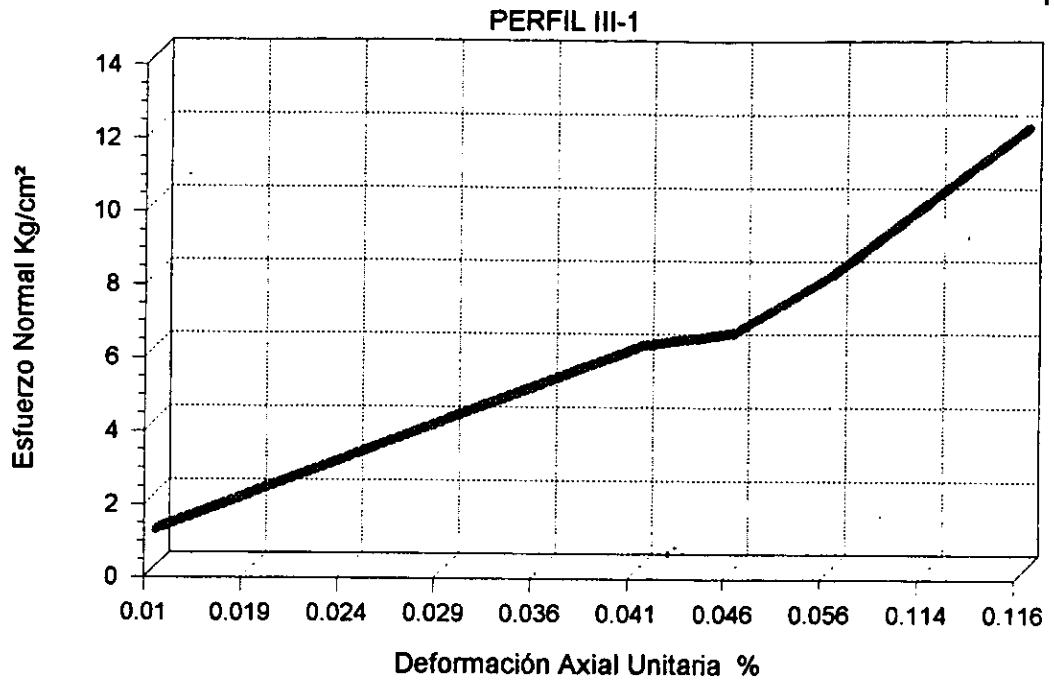
La resistencia de las capas endurecidas al corte fue diferente en los cuatro perfiles. En las figuras 23, 24, 25 y 26 se pueden observar los efectos a la aplicación de esfuerzo y la deformación de las muestras (probetas).

Para el perfil III-1, en la figura 23, se demuestra que al aplicarse una fuerza de  $12 \text{ kg/cm}^2$  la deformación unitaria fue de 0.116 %, donde su fractura coincide con los valores obtenidos por Grossman y Cline (1957) quienes con base en 34 terrones de fragipán encontraron intervalos de 4 a  $25 \text{ kg/cm}^2$ .

El perfil III-2, en la figura 24, nos demuestra que para su fracturación se requirió de un menor esfuerzo que fue de aproximadamente de  $2.8 \text{ kg/cm}^2$ , originándose su deformación unitaria muy reducida de 0.092 %. Estos datos corresponden con los intervalos de valores encontrados por Grossman y Cline(1957). La capa endurecida estuvo muy débilmente cementada, y sus valores de esfuerzo se relacionan con los valores de morfología de campo y su clasificación morfológica.

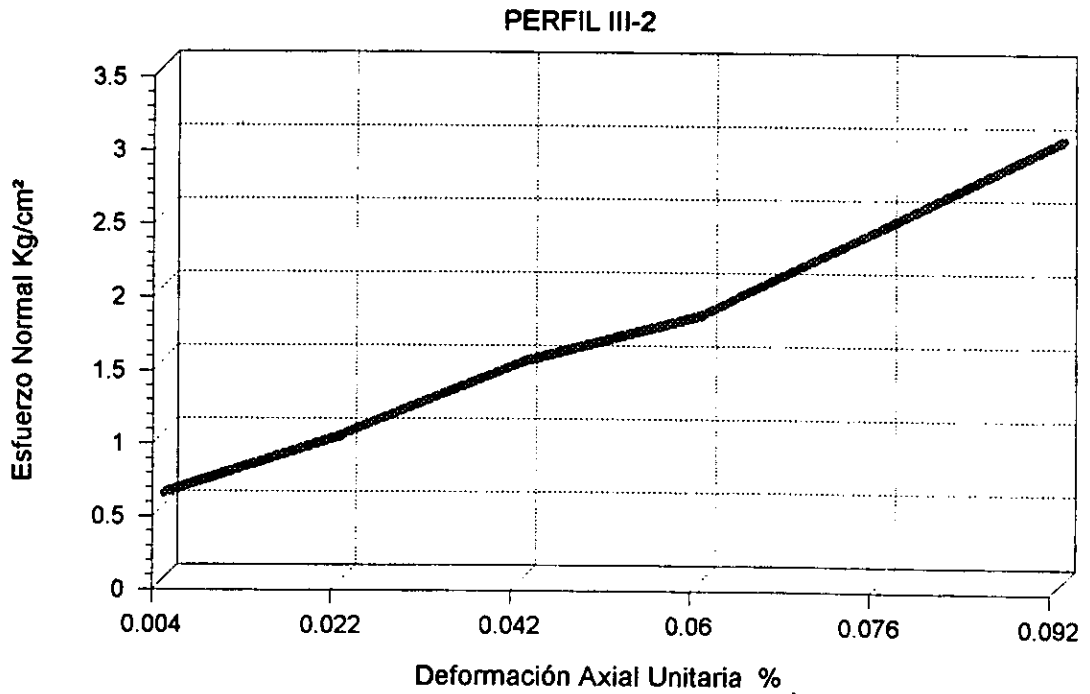
En la figura 25, los valores obtenidos del núcleo del PIII-3 fueron los más altos de los cuatro perfiles, puesto que el esfuerzo aplicado logró ser hasta de  $22 \text{ Kg/cm}^2$  y la deformación unitaria fue de 0.112. Con estos valores, se puede determinar que éste corresponda a un duripán. Nimlos (1989a) que encontró para los duripanes, intervalos de 3 a  $160 \text{ kg/cm}^2$  donde probablemente, los valores más bajos correspondieron a fragipanes.

En el perfil III-4 de la figura 26, se han podría ser un duripán, sus condiciones externas o ambientales son totalmente distintas a los anteriores perfiles, el valor obtenido de esfuerzo aplicado fue de  $13 \text{ Kg/cm}^2$  y su deformación unitaria de 0.118%.



Características de la Muestra:  
 Diámetro Medio 3.6 cm., Altura Promedio 10.5 cm.  
 Contenido de Agua 9.6%

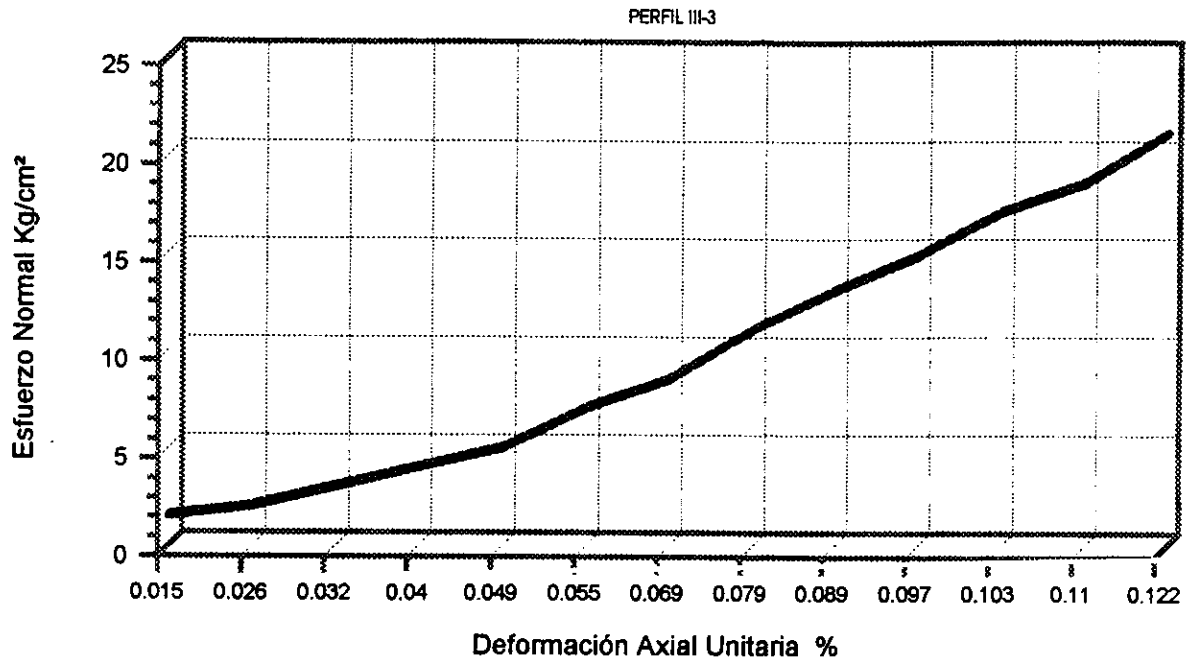
**Figura 23. RESISTENCIA A LA COMPRESION NO CONFINADA**



Características de la Muestra:  
 Diámetro Medio 3.6 cm., Altura Promedio 9.2 cm.  
 Contenido de Agua 9.3%

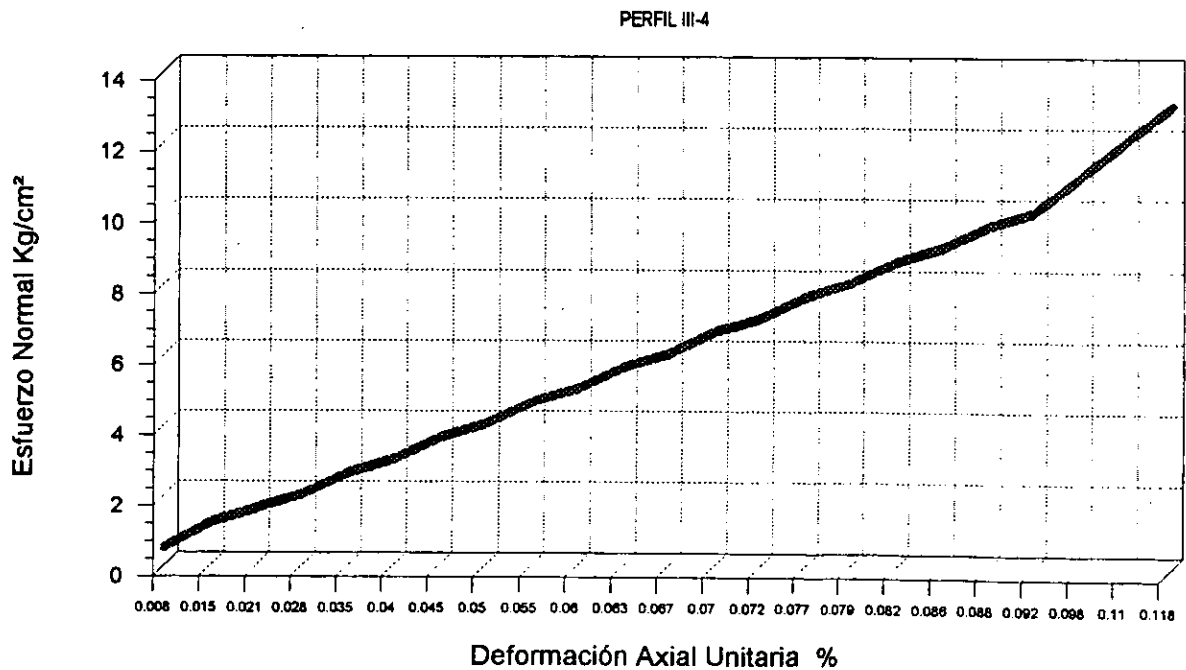
**Figura 24. RESISTENCIA A LA COMPRESION NO CONFINADA**





Características de la Muestra:  
 Diámetro Medio 3.6 cm., Altura Promedio 9.8 cm.  
 Contenido de Agua 8.0%

Figura 25. RESISTENCIA A LA COMPRESION NO CONFINADA



Características de la Muestra:  
 Diámetro Medio 3.6 cm., Altura Promedio 10.4 cm.  
 Contenido de Agua 6.0%

Figura 26. RESISTENCIA A LA COMPRESION NO CONFINADA

Los contenidos de humedad de las muestras de los tres primeros perfiles de suelos fueron uniformes, el perfil III-4, tuvo un menor contenido de Humedad y este fue del 6%.

Esta prueba permitió confirmar los esfuerzos requeridos para colapsar un núcleo de fragipán y otro de duripán, demostrando que para el primero, se requiere de un menor esfuerzo, y que para el segundo un mayor esfuerzo, esto debido principalmente a los contenidos de la sílice cementante que presentan la mayoría de los duripanes. Es necesario considerar la época de las tomas de las muestras, si se realizaron en época húmeda o en de secas.

### **8.3.2. Propiedades hidrológicas.**

#### **8.3.2.1. Estabilidad de fragmentos de capas endurecidas por inmersión en agua.**

Con base en Soil Taxonomy (1988), se realizó esta determinación en fragmentos de las capas endurecidas de los cuatro perfiles estudiados en inmersión de agua. De tales fragmentos los perfiles III-1 y 2 se fracturaron y finalmente se colapsaron entre los dos y cinco minutos a partir del inicio de la prueba.

Los materiales endurecidos de los perfiles III-3, y 4, después de varias semanas de observación no se fracturaron dentro del agua.

Tales resultados conducen a afirmar que el material endurecido de los perfil III-1 y 2, satisfacen una de las pruebas para considerarlos como fragipanes. El comportamiento de los fragmentos de los otros perfiles, permiten considerarlos parcialmente como duripanes.

#### **8.3.2.2. Estabilidad de fragmentos de capas endurecidas por inmersión en KOH concentrado(30%).**

Los fragmentos de las capas endurecidas se introdujeron en KOH concentrado a una temperatura aproximada de 40°C. En un tiempo relativamente corto, 5 a 15

minutos, empezaron a fracturarse, hasta quedar totalmente colapsados en 30 minutos.

Tal condición permite asegurar que el cementante que une las partículas minerales de las capas endurecidas de los perfiles estudiados es la sílice. Por lo tanto, el material endurecido de los perfil III-1 y 2 pueden ser fragipanes débilmente cementados por sílice y los otros perfiles, con mayor cementación, se podrían deducir en forma parcial como duripanes.

### **8.3.2.3. Infiltración.**

En las figuras 27, 28, 29, y 30 se presentaron valores de velocidad de infiltración, y la infiltración acumulada en cm de los suelos y de las capas endurecidas en intervalos de tiempo hasta 120 minutos, por el método de los cilindros concéntricos en los perfiles estudiados.

En la figura 27, del PIII-1, demuestra que los valores de velocidad de infiltración fueron más altos en el suelo que en la capa endurecida que obtuvo los valores más bajos. Los valores iniciales de infiltración en el suelo, registro 24 cm/hr mientras que la capa endurecida fue de 6 cm/hr. Aunque ambos al termino de 120 minutos registraron 0.40 cm/hr. En relación a la infiltración acumulada, ambos valores iniciales fueron bajos (0.41 y 0.10 cm ) y después de 120 minutos se incrementaron a 6.40 y 2.10 cm en el suelo y la capa endurecida respectivamente.

Para el PIII-2, en la figura 28, demuestra que los valores de velocidad y acumulación de la infiltración en el suelo fueron superiores a la capa endurecida, iniciando su velocidad de infiltración con 30 cm/hr y descendio en 120 minutos a 5.80 cm/hr. La capa endurecida inició su velocidad de infiltración en forma rápida registrando valores de 24 cm/hr pero al termino del intervalo de tiempo se nulificó. En relación a la infiltración acumulada, al término del tiempo de la practica, el suelo contenía 28 cm acumulados mientras que la capa endurecida 2.25 cm.

## PIII-1

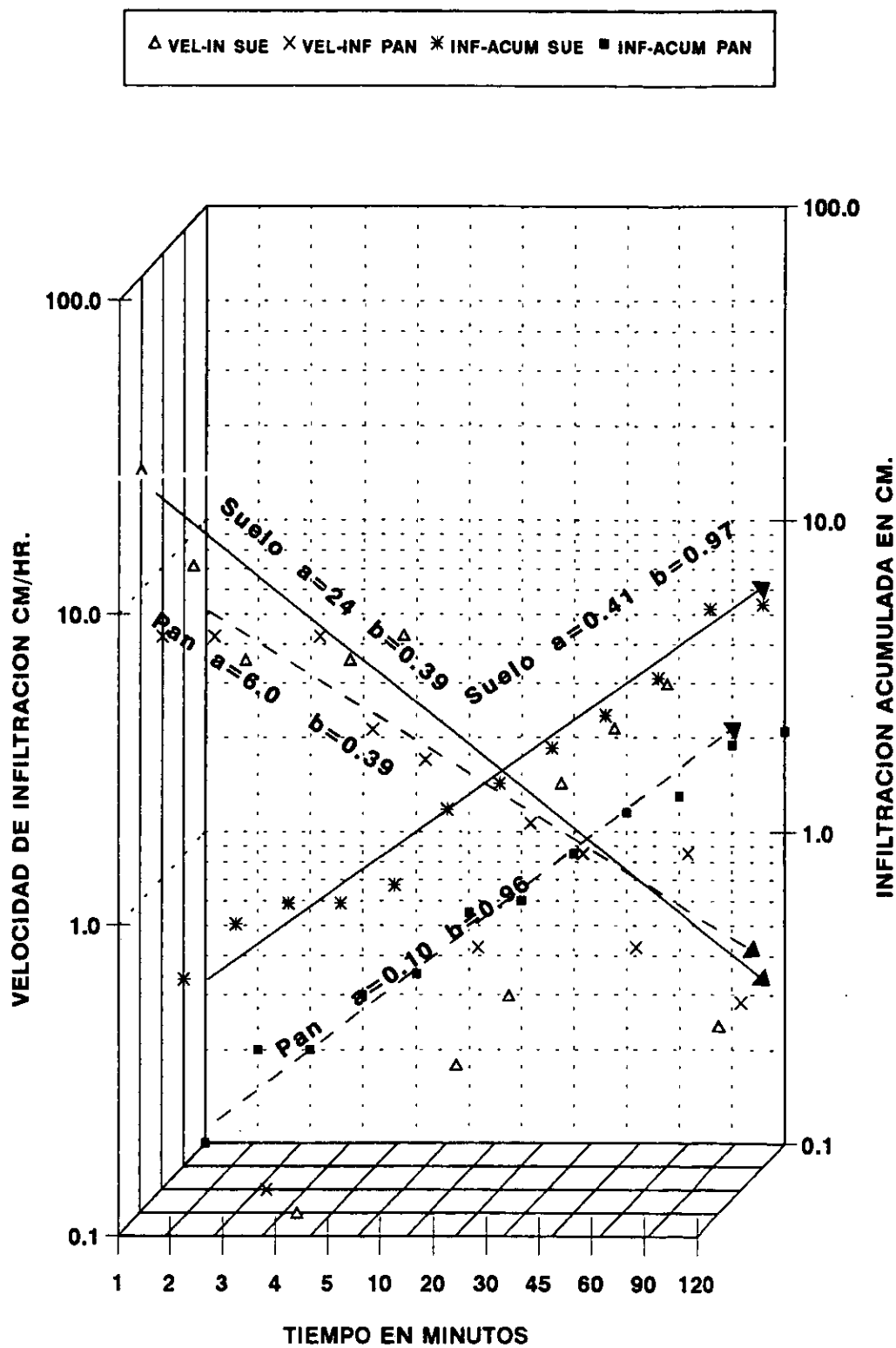


Figura 27. Velocidad y acumulación de infiltración

PIII-2

△ VEL-INF PAN × VEL-INF SUE \* INF-ACUM PAN ■ INF-ACUM SUE

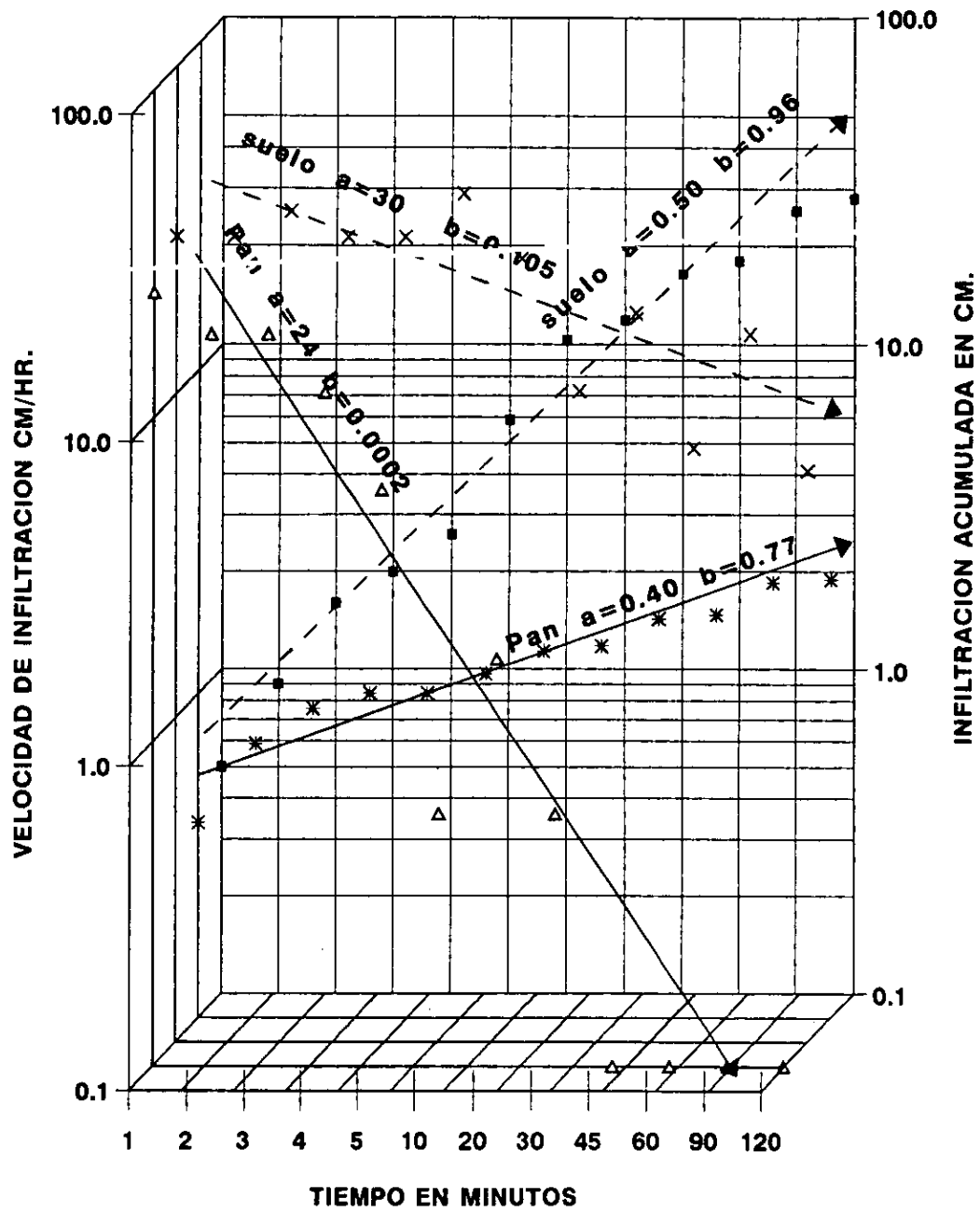


Figura 28. Velocidad y acumulación de infiltración

PIII-3

△ VEL-INF PAN × VEL-INF SUE \* INF-ACUM PAN ■ INF-ACUM SUE

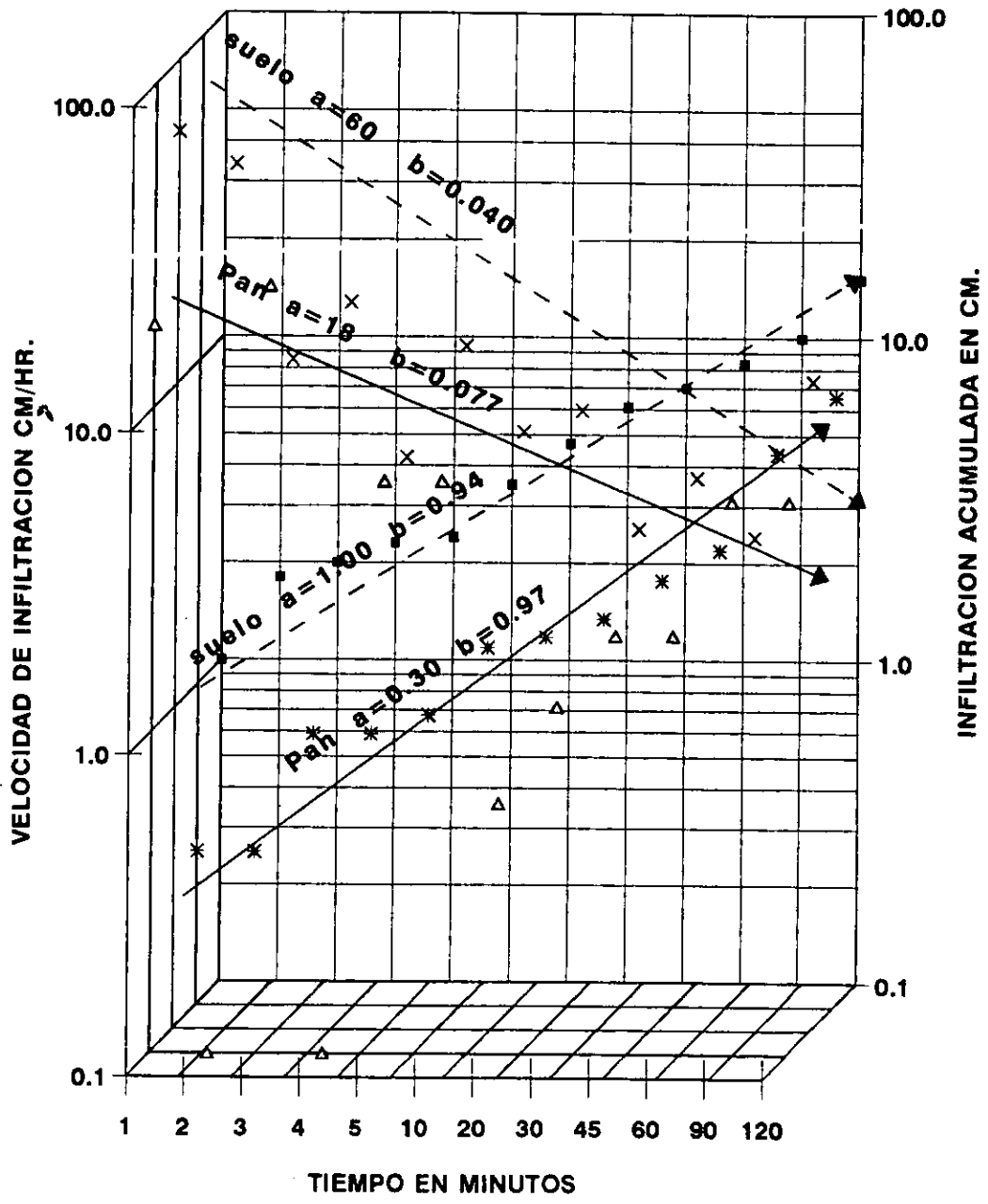


Figura 29. Velocidad y acumulación de infiltración

PIII-4

△ VEL-INF PAN × VEL-INF SUE \* INF-ACUM PAN ■ INF-ACUM SUE

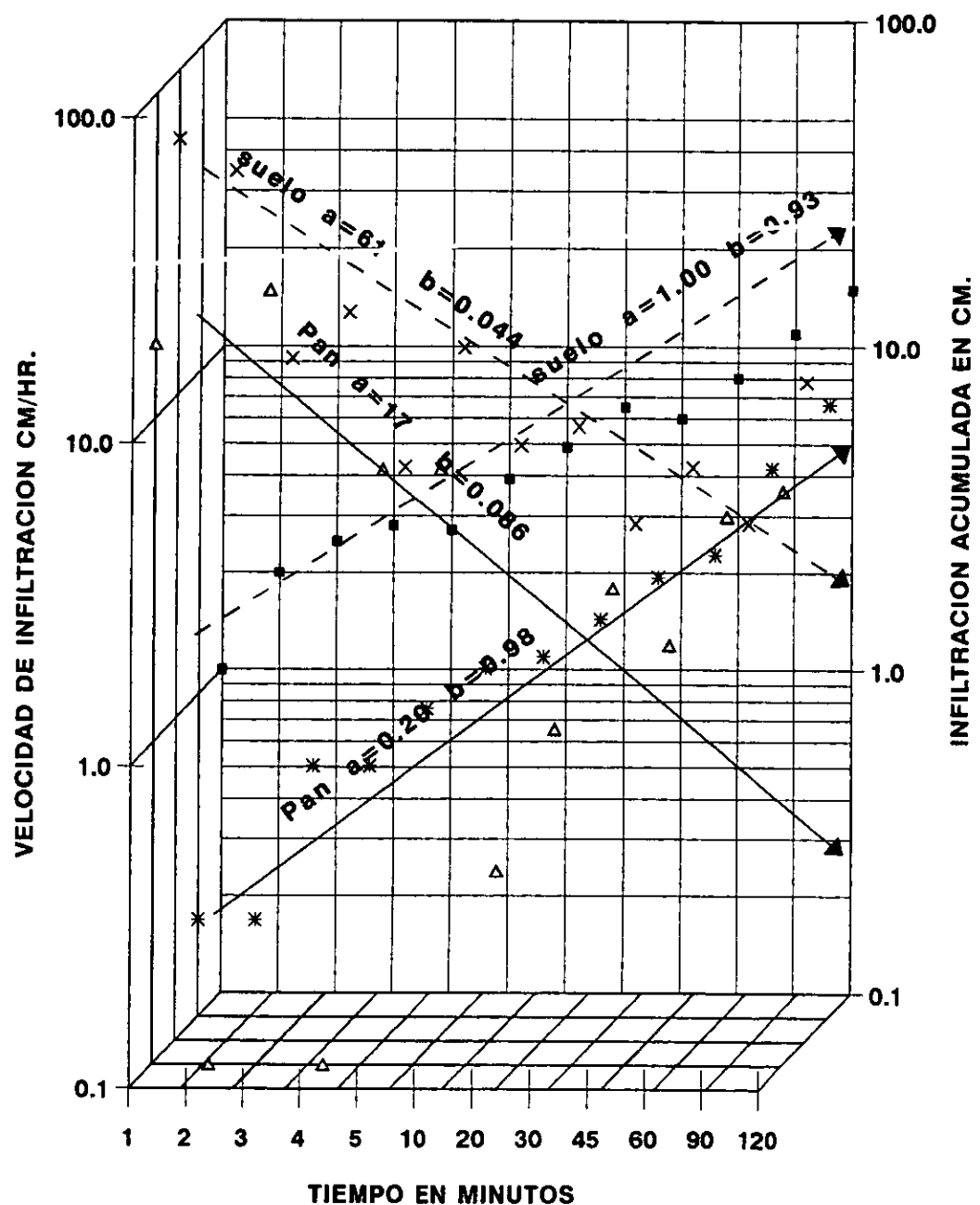


Figura 30. Velocida y acumulación de infiltración

En las figuras 29 y 30, de los perfiles III-3 y 4, la tendencia de los valores son muy similares en comportamiento, donde las cantidades de velocidad de infiltración de los suelos fueron mayores que los registrados en las capas endurecidas de ambos perfiles. La infiltración acumulada registró la misma tendencia que la velocidad de infiltración. Cabe señalar que en todos los perfiles, el comportamiento fue el esperado en las pruebas de infiltración y acumulación de la infiltración. En el capítulo 12. Anexos, (Paginas 152-159) se tienen los calculos de la velocidad y acumulación de infiltración).

#### 8.3.2.4. Conductividad hidráulica.

Los valores registrados fueron, para el perfil III-1, en el suelo fue de 0.4 cm/hr mientras que la capa endurecida registró 0.3 cm/hr. En el perfil III-2 el suelo obtuvo 0.7 cm/hr y la capa endurecida 0.38 cm/hr (Figura 31).

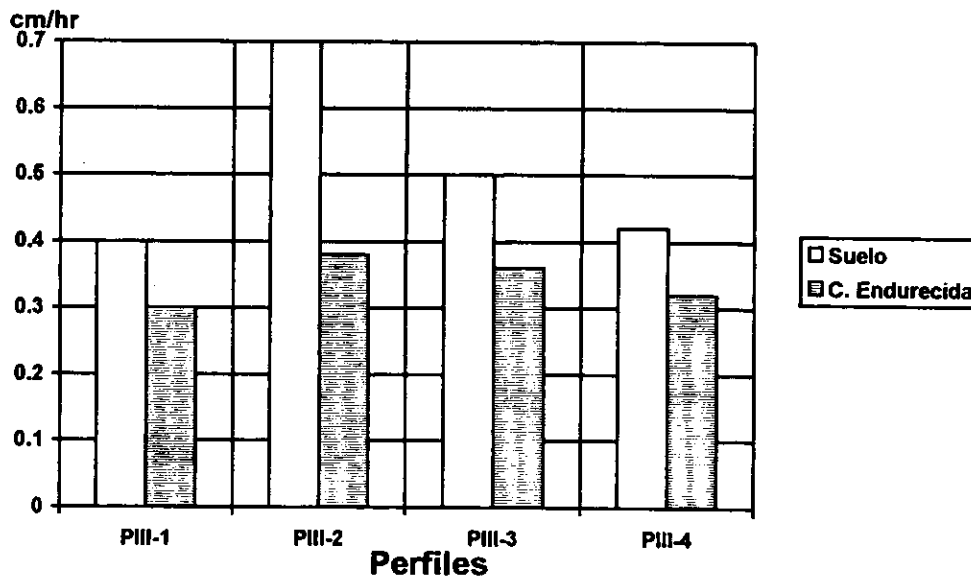


Figura 31. Valores de conductividad hidráulica en el suelos y capas endurecidas.



En el perfil III-3, el suelo registró 0.5 cm/hr y la capa endurecida 0.36 cm/hr, en el último perfil III-4, los valores obtenidos fueron 0.45 cm/hr y 0.32 cm/hr del suelo y la capa endurecida respectivamente.

Esta prueba, demuestra la baja permeabilidad que tienen las capas endurecidas, deteniendo el flujo del agua en forma vertical y originando el drenaje lateral interno que conlleva a la pérdida de las capas superficiales provocando el afloramiento de la capa endurecida. Cabe destacar, que el arreglo interno de las partículas de los materiales piroclásticos coadyuvan a que esta acción se lleve a cabo.

### **8.3.3. Análisis químicos.**

Las propiedades químicas principales están determinadas en la tabla 7, donde aparecen los cationes intercambiables, el porcentajes de saturación de bases, la capacidad de intercambio catiónico, la materia orgánica, el pH, el contenido de C y N y su relación C/N así como el  $AL^{3+}$  intercambiable. En el capítulo 12. Anexos, (páginas 171-178 ) se encuentran figuras donde se grafican los valores de los cationes intercambiables mas representativos, asi como, la relacion de carbono-nitrogeno de los suelos.

En la tabla 7, en el perfil III-1, los cationes intercambiables,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  presentan valores altos, debido a la interperización de los minerales primarios que los contienen tales como: feldespatos, anfíboles y piroxenos que fueron encontrados en este perfil. Los contenidos de  $Na^+$ , dan valores bajos que pueden ser suministrados en la interperización de los fedespatos labradorita, andesita y plagioclasas que no fueron identificados. Pero que puede estar comprendido dentro de los suelos de composición andesítica.

En relación a los niveles de  $K^+$ , en los horizontes superiores las concentración obtenidas fueron altas y en los horizontes de la parte media sus valores fueron medios, correspondiéndoles los valores más bajos a las parte inferiores del perfil; su suministro corresponde a las micas encontradas en los horizontes del suelo.

Tabla 7. Propiedades químicas principales.

| PERFIL | HZ               | PROF.<br>cm | Cationes Intercambiables<br>M.eq/100g |                  |                 |                | %<br>Sat.<br>Bases | C.I.C.T.<br>cmol(+)/<br>Kg suelo | Mat.<br>Org.<br>% | pH<br>H <sub>2</sub> O<br>1: 2.5 | C<br>% | N<br>% | C/N | Al <sup>3+</sup><br>Int. M.eq/<br>100g |
|--------|------------------|-------------|---------------------------------------|------------------|-----------------|----------------|--------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|--------|--------|-----|--|
|        |                  |             | Ca <sup>2+</sup>                      | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> |                    |                                  |                   |                                  |        |        |     |  |
| III-1  | A                | 0-35        | 8.1                                   | 2.9              | 1.5             | 1.4            | 63                 | 22                               | 5.23              | 6.6                              | 3.06   | 0.26   | 12  | 1.8                                    |
|        | B11              | 35-54       | 9.8                                   | 1.8              | 0.8             | 3.5            | 76                 | 21                               | 1.87              | 6.8                              |        |        |     | 2.5                                    |
|        | B12              | 54-85       | 7.7                                   | 6.2              | 1.0             | 0.5            | 70                 | 22                               | 0.73              | 6.7                              |        |        |     | 2.2                                    |
|        | Bt21             | 85-210      | 6.0                                   | 5.0              | 0.8             | 0.3            | 55                 | 22                               | 0.60              | 6.8                              |        |        |     | 1.8                                    |
|        | Bt22             | 210-270     | 7.3                                   | 2.1              | 1.5             | 3.5            | 51                 | 28                               | 0.53              | 6.7                              |        |        |     | 1.8                                    |
|        | BC               | 270-285     | 9.0                                   | 0.4              | 1.4             | 3.5            | 63                 | 17                               | 0.33              | 6.8                              |        |        |     | 1.0                                    |
|        | Cx               | 285-+       | 7.3                                   | 1.7              | 1.0             | 0.1            | 100                | 10                               | 0.19              | 7.0                              |        |        |     | 3.7                                    |
| III-2  | O                | 0-10        | 6.4                                   | 6.0              | 1.0             | 2.0            | 100                | 11                               | 5.70              | 6.5                              | 3.30   | 0.28   | 12  | 1.8                                    |
|        | A11              | 10-26       | 9.7                                   | 6.9              | 1.0             | 0.4            | 100                | 14                               | 2.19              | 7.0                              | 1.27   | 0.10   | 13  | 1.0                                    |
|        | A12              | 26-42       | 5.5                                   | 0.0              | 3.5             | 0.5            | 86                 | 12                               | 0.92              | 6.7                              | 0.53   | 0.04   | 13  | 1.0                                    |
|        | Bt2 <sub>b</sub> | 42-90       | 4.3                                   | 3.4              | 1.0             | 0.5            | 54                 | 17                               | 0.59              | 7.0                              |        |        |     | 1.0                                    |
|        | BC <sub>b</sub>  | 90-125      | 6.8                                   | 3.8              | 1.4             | 0.3            | 100                | 12                               | 0.33              | 6.8                              |        |        |     | 1.1                                    |
|        | Cx <sub>b</sub>  | 125-+       | 7.3                                   | 1.7              | 1.0             | 0.1            | 50                 | 20                               | 0.19              | 6.8                              |        |        |     | 1.0                                    |
| III-3  | A                | 0-10        | 10.6                                  | 6.9              | 1.0             | 2.3            | 83                 | 25                               | 4.50              | 6.9                              | 2.61   | 0.22   | 12  | 1.8                                    |
|        | Bt21             | 10-20       | 10.6                                  | 6.9              | 1.5             | 2.3            | 69                 | 31                               | 3.40              | 6.8                              |        |        |     | 1.8                                    |
|        | Bt22             | 20-28       | 7.5                                   | 4.3              | 1.0             | 1.6            | 46                 | 31                               | 3.30              | 6.8                              |        |        |     | 2.2                                    |
|        | Cqm              | 28-42       | 8.5                                   | 5.2              | 1.0             | 1.4            | 49                 | 33                               | 2.40              | 6.8                              |        |        |     | 1.8                                    |
|        | C                | 42-125      | 8.5                                   | 8.3              | 1.4             | 0.7            | 73                 | 26                               | 0.70              | 7.1                              |        |        |     | 1.1                                    |
| III-4  | A                | 0-15        | 4.9                                   | 0.6              | 0.2             | 1.1            | 52                 | 13                               | 2.70              | 7.0                              | 1.56   | 0.13   | 12  | 2.9                                    |
|        | Bw               | 15-44       | 4.9                                   | 1.8              | 0.2             | 1.0            | 46                 | 15.2                             | 1.50              | 7.0                              |        |        |     | 1.5                                    |
|        | Cqm              | 44-104      | 3.6                                   | 2.4              | 0.2             | 1.1            | 66                 | 11                               | 0.06              | 7.0                              |        |        |     | 1.9                                    |
|        | C                | 104-+       | 3.6                                   | 0.9              | 0.2             | 2.0            | 67                 | 10                               | 0.06              | 7.1                              |        |        |     | 1.1                                    |

El porcentaje de saturación de bases fue en general de medio a alto, correspondiendo a los valores de pH, que fueron marcando hacia la neutralidad del suelo en todos sus horizontes. Los valores de  $AL^{3+}$  se consideran valores de medio a alto debido a la interperización de los minerales que existen en todo el perfil del suelo como la caolinita y metahalosita principalmente.

Cabe hacer el señalamiento que la presencia de estos minerales secundarios es indicadora de suelos originados de cenizas volcánicas y se pueden considerar suelos con moderado a alto desarrollo.

Los contenidos de C y N y su relación, nos dan valores de medios a bajos nos indican de una estabilidad y liberación de nitrógeno mineral. La capacidad de intercambio catiónico, es de media a baja correlacionándose con los minerales que contiene el perfil (Capítulo 12. Anexos, páginas 170-177).

Para el perfil III-2, los valores de calcio, magnesio, sodio y potasio conciden con el primer perfil, solamente en el horizonte A12, los niveles de sodio tienden a incrementarse, deduciéndose que es por la interperización de los anfíboles y piroxenos, tales como augita-egirina, cabe señalar que el porcentaje de saturación de bases es alto en la mayoría de los horizontes del suelo y la capacidad de intercambio catiónico es baja de acuerdo con los minerales que contiene el perfil.

La materia orgánica en los primeros horizontes es alta decreciendo a medida que se profundiza y la relación de carbono-nitrógeno es de media a baja. El contenido de aluminio intercambiable es bajo. Para el perfil III-3, los valores son similares a los perfiles descritos.

Para el perfil III-4, los valores obtenidos sufren variación en relación a los perfiles anteriores, debido a que esta área a sufrido los efectos de fuerte fenómeno de erosión, quedando al descubierto grandes extensiones de suelo con grandes cárcavas. Los valores de los cationes intercambiables son bajos solamente el potasio se considera alto por consecuente el porcentaje de saturación de bases es de medio a bajo, esto debido a la pérdida del suelo. El contenido de materia

orgánica es de medio a bajo y el pH es neutro en todos los horizontes del perfil del suelo. Los valores de relación C/N son bajos y el aluminio intercambiable es bajo (Capítulo 12. Anexos, páginas 174-177).

### 8.3.3.1. Pérdidas y ganancias de óxidos totales.

En las tablas 8, 9, 10, y 11 se tienen las pérdidas y ganancias de los horizontes meteorizados en relación con la roca basal de los perfiles estudiados, esto indica su grado de alteración.

En la tabla 8, que corresponde al perfil III-1, que las ganancias de FeO, MnO, TiO<sub>2</sub>, y CaO se debió a las aportaciones generadas de la alteración de piroxenos de magnesio y fierro, así como hematita, magnetita y anfíboles. Para el CaO, se debe a las aportaciones realizadas de feldespatos de calcio. Las aportaciones de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> corresponde a los vidrios volcánicos y a los minerales secundarios como la caolinita, la metahalloysita y gibsita.

Se puede observar que SiO<sub>2</sub>, MgO y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> manifestaron pérdidas en la mayoría de los horizontes, excepto en el horizonte superior. La pérdida de la sílice en los horizontes inferiores, se puede fundamentar por proceso de interperización del suelos que fueron removidos mediante el movimiento del agua a través del suelo a los horizontes inferiores y perdidos por lixiviación. Este fenómeno es aplicado también a las pérdidas de óxidos como MgO y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> lo cual es congruente con las condiciones de alteración moderada actual que limita la liberación de cationes y óxidos libres (Duchaufour, 1984), situación que conlleva al caso de la sílice, a su precipitación como cementante en el horizonte Cx. La ganancia de H<sub>2</sub>O<sup>-</sup> en los horizontes es el resultado de un incremento de arcillas microcristalinas,

La presencia de sodio en el horizonte superficial posiblemente es por la presencia de feldespatos; además, al ser interperizado en los horizontes superiores tiende a acumularse en el horizonte BC.

En el perfil III-2, descrito en la tabla 9, la ganancia de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> corresponde a las aportaciones realizadas por el vidrios volcánicos y a los minerales secundarios

Tabla 8. PERFIL III.-1, PERIDAS Y GANACIAS DE LOS HORIZONTES METEORIZADOS EN RELACION CON LA ROCA BASAL

| OXIDOS<br>TOTALES              | HORIZONTES |        |       |       |       |       |       | BC.K*<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Bt22.K<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Bt21.K<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | B12.K<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | B11.K<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | A.K<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Perdidas |       |       | Y      |       | Ganacias |  |
|--------------------------------|------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--|---|---|--|--|--|----------|-------|-------|--------|-------|----------|--|
|                                | Cx         | BC     | Bt22  | Bt21  | B12   | B11   | A     |  |   |   |  |  |  | BC       | Bt22  | Bt21  | B12    | B11   | A        |  |
| SiO <sub>2</sub>               | 48.01      | 40.60  | 36.72 | 41.03 | 33.42 | 37.72 | 38.87 | 41.34                                      | 40.21                                       | 49.96                                       | 32.89                                      | 41.72                                      | 63.08                                    | -6.67    | -7.80 | 1.95  | -15.12 | -6.29 | 15.07    |  |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.14       | 2.30   | 1.77  | 1.77  | 2.00  | 1.77  | 1.46  | 2.35                                       | 1.94  | 1.94  | 2.16                                       | 1.97                                       | 2.37                                     | 1.21     | 0.80  | 1.02  | 0.83   | 0.82  | 1.23     |  |
| AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20.62      | 25.63  | 27.96 | 27.96 | 27.66 | 26.20 | 25.75 | 26.19                                      | 30.62                                       | 33.73                                       | 27.22                                      | 28.98                                      | 41.79                                    | 5.57     | 10.00 | 13.11 | 6.60   | 8.36  | 21.17    |  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9.90       | 9.69   | 9.04  | 9.04  | 10.06 | 8.96  | 6.10  | 9.90                                       | 9.90  | 9.90  | 9.90                                       | 9.90                                       | 9.90                                     | 0.00     | 0.00  | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00     |  |
| FeO                            | 0.78       | 0.78   | 1.04  | 8.13  | 0.52  | 0.91  | 1.95  | 0.80                                       | 1.14  | 0.63  | 0.51                                       | 1.01                                       | 3.16                                     | 0.02     | 0.36  | -0.15 | -0.27  | 0.23  | 2.38     |  |
| MnO                            | 0.05       | 0.15   | 0.11  | 0.52  | 0.07  | 0.05  | 0.06  | 0.15                                       | 0.12  | 0.09  | 0.07                                       | 0.06                                       | 0.10                                     | 0.10     | 0.07  | 0.04  | 0.02   | 0.01  | 0.05     |  |
| MgO                            | 1.47       | 0.74   | 0.72  | 0.72  | 1.11  | 0.92  | 1.35  | 0.76                                       | 0.79  | 0.88  | 1.09                                       | 1.02                                       | 2.19                                     | -0.71    | -0.68 | -0.59 | -0.38  | -0.45 | 0.72     |  |
| CaO                            | 0.30       | 0.40   | 0.40  | 0.50  | 0.30  | 0.79  | 1.79  | 0.41                                       | 0.44  | 0.61  | 0.30                                       | 0.87                                       | 2.91                                     | 0.11     | 0.14  | 0.31  | 0.00   | 0.57  | 2.61     |  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.40       | 0.50   | 0.00  | 0.00  | 0.20  | 0.30  | 0.60  | 0.51                                       | 0.00  | 0.00  | 0.20                                       | 0.33                                       | 0.97                                     | 0.11     | -0.40 | -0.40 | -0.20  | -0.07 | 0.57     |  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.50       | 0.60   | 0.40  | 0.40  | 0.50  | 0.50  | 0.60  | 0.61                                       | 0.44  | 0.49  | 0.49                                       | 0.55                                       | 0.97                                     | 0.11     | -0.06 | -0.01 | -0.01  | 0.05  | 0.47     |  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.13       | 0.00   | 0.00  | 0.00  | 0.70  | 0.00  | 0.09  | 0.00                                       | 0.00  | 0.00  | 0.69                                       | 0.00                                       | 0.15                                     | -0.13    | -0.13 | -0.13 | 0.56   | -0.13 | 0.02     |  |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 4.71       | 7.95   | 7.26  | 6.54  | 9.31  | 7.80  | 6.20  | 8.12                                       | 7.95  | 7.96  | 9.16                                       | 8.63                                       | 10.06                                    | 3.41     | 3.24  | 3.25  | 4.45   | 3.92  | 5.35     |  |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 11.90      | 10.82  | 13.74 | 12.37 | 13.79 | 14.07 | 15.11 | 11.05                                      | 15.05                                       | 15.06                                       | 13.57                                      | 15.56                                      | 24.52                                    | -0.85    | 3.15  | 3.16  | 1.67   | 3.66  | 12.62    |  |
| TOTAL                          | 99.10      | 100.02 | 99.16 | 99.75 | 99.64 | 99.98 | 99.93 |  |   |   |  |  |  |          |       |       |        |       |          |  |

\*.-La constante (k) de aluminio se obtiene de dividir el porcentaje de aluminio de la roca inalterada (Cx) entre los porcentajes de aluminio de la roca alterada (BC, Bt22, Bt21, B12, B11 y A). Esta constante se multiplica por cada uno de los óxidos de los horizontes alterados.

Los resultados se comparan con las rocas inalteradas y por diferencia o adición se obtienen pérdidas y ganancias

Tabla 9. PERFIL III.-2, PERIDAS Y GANACIAS DE LOS HORIZONTES METEORIZADOS EN RELACION CON LA ROCA BASAL

| OXIDOS<br>TOTALES              | HORIZONTES      |                 |                 |              |              |               | BC <sub>b</sub> .K*<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Bt <sub>2</sub> .K<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | A12.K<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | A11.K<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | O.K<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Perdidas o Ganacias |                 |        |        |       |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|---------------|--|---|--|--|--|---------------------|-----------------|--------|--------|-------|
|                                | Cx <sub>b</sub> | BC <sub>b</sub> | Bt <sub>2</sub> | A12          | A11          | O             |  |   |  |  |  | BC <sub>b</sub>     | Bt <sub>2</sub> | A12    | A11    | O     |
| SiO <sub>2</sub>               | 54.78           | 42.53           | 44.58           | 42.46        | 46.02        | 44.05         | 37.60  | 48.25   | 44.73                                      | 44.76                                      | 54.58                                    | -17.18              | -6.53           | -10.05 | -10.02 | -0.20 |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.50            | 1.38            | 2.30            | 1.16         | 1.12         | 2.40          | 1.22   | 2.49  | 1.22                                       | 1.09                                       | 2.97                                     | -0.28               | 0.99            | -0.28  | -0.41  | 1.47  |
| AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20.11           | 28.10           | 26.58           | 27.11        | 25.32        | 22.50         | 24.85  | 28.77   | 28.56                                      | 24.63                                      | 27.88                                    | 4.74                | 8.66            | 8.45   | 4.52   | 7.77  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7.10            | 8.03            | 6.56            | 6.74         | 7.30         | 5.73          | 7.10   | 7.10  | 7.10                                       | 7.10                                       | 7.10                                     | 0.00                | 0.00            | 0.00   | 0.00   | 0.00  |
| FeO                            | 0.30            | 0.63            | 2.21            | 0.52         | 0.52         | 2.21          | 0.56   | 2.39  | 0.55                                       | 0.51                                       | 2.74                                     | 0.26                | 2.09            | 0.25   | 0.21   | 2.44  |
| MnO                            | 0.08            | 0.04            | 0.05            | 0.03         | 0.03         | 0.16          | 0.04   | 0.05  | 0.30                                       | 0.03                                       | 0.20                                     | -0.04               | -0.03           | 0.22   | -0.05  | 0.12  |
| MgO                            | 0.22            | 0.18            | 0.99            | 0.74         | 1.10         | 1.02          | 0.16   | 1.07  | 0.78                                       | 1.07                                       | 1.26                                     | -0.06               | 0.85            | 0.56   | 0.85   | 1.04  |
| CaO                            | 0.61            | 0.24            | 0.89            | 0.10         | 0.30         | 0.99          | 0.21   | 0.96  | 0.11                                       | 0.29                                       | 1.23                                     | -0.40               | 0.35            | -0.50  | -0.32  | 0.62  |
| Na <sub>2</sub> O              | 1.80            | 0.60            | 0.30            | 0.00         | 0.00         | 1.10          | 0.53   | 0.32  | 0.00                                       | 0.00                                       | 1.36                                     | -1.27               | -1.48           | -1.80  | -1.80  | -0.44 |
| K <sub>2</sub> O               | 0.90            | 0.20            | 0.50            | 0.10         | 0.20         | 0.60          | 0.18   | 0.54  | 0.11                                       | 0.19                                       | 0.74                                     | -0.72               | -0.36           | -0.79  | -0.71  | -0.16 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.46            | 0.49            | 0.00            | 0.50         | 0.90         | 0.37          | 0.43   | 0.00  | 0.53                                       | 0.88                                       | 0.46                                     | -0.03               | -0.46           | 0.07   | 0.42   | 0.00  |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 3.01            | 3.51            | 3.00            | 5.57         | 4.10         | 4.65          | 3.10   | 3.25  | 5.87                                       | 3.99                                       | 5.76                                     | 0.09                | 0.24            | 2.86   | 0.98   | 2.75  |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 8.94            | 13.19           | 12.02           | 14.47        | 12.63        | 14.58         | 11.66  | 13.01   | 15.24                                      | 12.28                                      | 18.07                                    | 2.72                | 4.07            | 6.30   | 3.34   | 9.13  |
| <b>TOTAL</b>                   | <b>99.81</b>    | <b>99.12</b>    | <b>99.98</b>    | <b>99.50</b> | <b>99.54</b> | <b>100.36</b> |  |   |  |  |  |                     |                 |        |        |       |

\*.-La constante (k) de aluminio se obtiene de dividir el porcentaje de aluminio de la roca inalterada (Cx<sub>b</sub>) entre los porcentajes de aluminio de la roca alterada (BC<sub>b</sub>, Bt<sub>2</sub>, A12, A11 y O). Esta constante se multiplica por cada uno de los óxidos de los horizontes alterados. Los resultados se comparan con las rocas inalteradas y por diferencia o adición se obtienen pérdidas y ganancias.

Tabla 10. PERFIL III.-3, PERIDAS Y GANACIAS DE LOS HORIZONTES METEORIZADOS EN RELACION CON LA ROC BASAL

| OXIDOS<br>TOTALES              | HORIZONTES |       |       |       |       | Cqm.K*<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Bt22.K<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Bt21.K<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | A.K<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Perdidas o Ganacias |        |       |       |
|--------------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|---|---|---|--|---------------------|--------|-------|-------|
|                                | C          | Cqm   | Bt22  | Bt21  | A     |   |   |   |  | Cqm                 | Bt22   | Bt21  | A     |
| SiO <sub>2</sub>               | 46.86      | 43.00 | 39.13 | 44.00 | 41.66 | 46.88                                       | 35.46                                       | 49.53                                       | 39.27                                    | 0.02                | -11.40 | 2.67  | -7.59 |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.63       | 1.25  | 1.30  | 1.63  | 1.88  | 1.36  | 1.18  | 1.83  | 1.77                                     | -0.27               | -0.45  | 0.20  | 0.14  |
| AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 22.11      | 23.66 | 25.44 | 20.69 | 22.72 | 25.80                                       | 23.05                                       | 23.29                                       | 21.41                                    | 3.69                | 0.94   | 1.18  | -0.70 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8.69       | 7.97  | 9.59  | 7.72  | 9.22  | 8.69  | 8.69  | 8.69  | 8.69                                     | 0.00                | 0.00   | 0.00  | 0.00  |
| FeO                            | 0.33       | 0.49  | 0.49  | 1.21  | 0.73  | 0.53  | 0.44  | 1.36  | 0.69                                     | 0.20                | 0.11   | 1.03  | 0.36  |
| MnO                            | 0.28       | 0.34  | 0.32  | 0.32  | 0.20  | 0.37  | 0.29  | 0.36  | 0.19                                     | 0.09                | 0.01   | 0.08  | -0.09 |
| MgO                            | 0.61       | 0.32  | 0.23  | 0.38  | 0.25  | 0.35  | 0.21  | 0.43  | 0.24                                     | -0.26               | -0.40  | -0.18 | -0.37 |
| CaO                            | 0.43       | 0.85  | 0.37  | 0.61  | 0.61  | 0.93  | 0.34  | 0.69  | 0.57                                     | 0.50                | -0.09  | 0.26  | 0.14  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.90       | 1.00  | 1.00  | 1.10  | 1.30  | 1.09  | 0.91  | 1.24  | 1.23                                     | 0.19                | 0.01   | 0.34  | 0.33  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.60       | 0.70  | 0.80  | 0.80  | 1.00  | 0.76  | 0.72  | 0.90  | 0.94                                     | 0.16                | 0.12   | 0.30  | 0.34  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.60       | 0.57  | 0.71  | 0.74  | 0.61  | 0.62  | 0.64  | 0.83  | 0.57                                     | 0.02                | 0.04   | 0.23  | -0.03 |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 5.97       | 6.80  | 6.59  | 3.32  | 5.29  | 7.41  | 5.97  | 3.74  | 4.99                                     | 1.44                | 0.00   | -2.23 | -0.98 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 10.86      | 12.91 | 13.98 | 15.78 | 14.37 | 14.08                                       | 12.67                                       | 17.76                                       | 13.54                                    | 3.22                | 1.81   | 6.90  | 2.68  |
| TOTAL                          | 99.87      | 99.86 | 99.95 | 98.30 | 99.84 |   |   |   |  |                     |        |       |       |

\*.-La constante (k) de aluminio se obtiene de dividir el porcentaje de aluminio de la roca inalterada (C) entre los porcentajes de aluminio de la roca alterada (Cqm, Bt22, Bt21 y A). Esta constante se multiplica por cada uno de los óxidos de los horizontes alterados. Los resultados se comparan con las rocas inalteradas y por diferencia o adición se obtienen pérdidas y ganancias

Tabla 11. PERFIL III-4, PERIDAS Y GANACIAS DE LOS HORIZONTES METEORIZADOS EN RELACION CON LA ROCA BASAL

| OXIDOS<br>TOTALES              | HORIZONTES |        |       |       | Cqm.K*<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Bw.K<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | A.K<br>de AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Perdidas o Ganacias |       |       |
|--------------------------------|------------|--------|-------|-------|---|---|--|---------------------|-------|-------|
|                                | C          | Cqm    | Bw    | A     |   |   |  | Cqm                 | Bw    | A     |
| SiO <sub>2</sub>               | 43.11      | 60.40  | 44.47 | 44.00 | 65.35                                       | 42.74                                     | 40.61                                    | 22.24               | -0.37 | -2.50 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.17       | 0.17   | 0.15  | 1.75  | 0.18  | 0.14                                      | 1.62                                     | 0.01                | -0.03 | 1.45  |
| AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25.39      | 17.52  | 24.32 | 20.36 | 18.96                                       | 23.37                                     | 18.79                                    | -6.43               | -2.02 | -6.60 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7.66       | 7.08   | 7.97  | 8.30  | 7.66  | 7.66                                      | 7.66                                     | 0.00                | 0.00  | 0.00  |
| FeO                            | 1.83       | 1.83   | 1.83  | 0.77  | 1.98  | 1.76                                      | 0.71                                     | 0.15                | -0.07 | -1.12 |
| MnO                            | 0.13       | 0.03   | 0.05  | 0.08  | 0.03  | 0.05                                      | 0.07                                     | -0.10               | -0.08 | -0.06 |
| MgO                            | 0.28       | 0.64   | 1.32  | 0.42  | 0.69  | 1.27                                      | 0.39                                     | 0.41                | 0.99  | 0.11  |
| CaO                            | 0.86       | 1.53   | 1.47  | 0.79  | 1.66  | 1.41                                      | 0.73                                     | 0.80                | 0.55  | -0.13 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.74       | 1.90   | 1.20  | 2.40  | 2.06  | 1.15                                      | 2.21                                     | 1.32                | 0.41  | 1.47  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.20       | 0.80   | 0.50  | 1.10  | 0.87  | 0.48                                      | 1.02                                     | 0.67                | 0.28  | 0.82  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.10       | 0.05   | 0.10  | 0.73  | 0.05  | 0.10                                      | 0.67                                     | -0.05               | 0.00  | 0.57  |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 10.55      | 5.96   | 11.07 | 5.02  | 6.45  | 10.64                                     | 4.63                                     | -4.10               | 0.09  | -5.92 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 8.65       | 2.14   | 5.06  | 14.22 | 2.32  | 4.86                                      | 13.12                                    | -6.33               | -3.79 | 4.47  |
| TOTAL                          | 99.67      | 100.05 | 99.51 | 99.94 |   |   |  |                     |       |       |

\*.-La constante (k) de aluminio se obtiene de dividir el porcentaje de aluminio de la roca inalterada (C) entre los porcentajes de aluminio de la roca alterada (Cqm, Bw y A). Esta constante se multiplica por cada uno de los óxidos de los horizontes alterados. Los resultados se comparan con las rocas inalteradas y por diferencia o adición se obtienen pérdidas y ganancias



como la caolinita y la metahalloysita. Las ganancias FeO es debido a las aportaciones realizadas por los anfíboles y piroxenos.

Las pérdidas de los óxidos de sílice y de sodio se dieron en todos los horizontes del suelo por el proceso de interperización y lixiviación. La ganancia de  $H_2O$  en todo el suelo, se debe por lo anteriormente comentado en el perfil III-1, que es por la presencia de las arcillas como la montmorillonita. De igual manera resulta con la pérdida de los óxidos restantes son debido en forma similar, a lo argumentado en el perfil anterior.

Para el perfil III-3, en la tabla 10, de la misma manera, se detalla la tendencia de acumulación de la sílice en los horizontes inferiores. Se dio la ganancia de  $H_2O$  con la explicación anteriormente señalada, y la ganancia de  $Na_2O$ , se debió a la misma razón que en los perfiles anteriores, aunque no es significativa.

La tabla 11, demuestra los datos del perfil III-4, existiendo pérdidas de la sílice en la parte superior del perfil, tendiéndose a acumular en los horizontes inferiores sobre todo en la capa endurecida. La ganancia de los óxidos de  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$  y  $K_2O$  se debe a semejanza de los perfiles anteriores a la presencia de los feldespatos y otros minerales piroclásticos.

### **8.3.3.2. Relaciones molares.**

Como se observa en la tabla 12, las relaciones molares son de medias a bajas, indicando suelos o materiales alterados, representando un nivel medio a alto de interperismo. La relación sílice /aluminio ( $S/a$ ), dan valores medios. La relación sílice-hierro( $S/f$ ) muestra cantidades más altas que la relación  $S/a$ , debido a la gran abundancia del aluminio sobre el hierro. La relación sílice-sequíóxidos ( $S/R_2O_3$ ), es también baja.

Los porcentajes de  $SiO_2$  total registrados en la muestras de las capas endurecidas estudiadas oscilan de 33.42 a 60.40 lo cual no concuerda con los niveles reportados por Goudie (1973) citado por Quiñonez (1987), quien señala que la capas endurecidas conocidas como duripanes de Sudáfrica y Australia

Tabla 12. Óxidos totales, óxidos libres y relaciones molares.

| PERFI | HZ              | PROF.<br>cm | Óxidos totales   |                  |                                |                                |      |      |      |      |                   |                  |                               |                               |                  | H <sub>2</sub> O <sup>-</sup> | Total | Óxidos libres                  |                                |      | Relaciones molares |                                 |  |
|-------|-----------------|-------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|------|--------------------|---------------------------------|--|
|       |                 |             | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO  | MnO  | MgO  | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> | SiO <sub>2</sub> |                               |       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | S/a  | S/f                | S/R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |  |
| III-1 | A               | 0-35        | 38.87            | 1.46             | 25.75                          | 6.10                           | 1.95 | 0.06 | 1.35 | 1.79 | 0.60              | 0.60             | 0.09                          | 6.20                          | 15.11            | 99.93                         | 6.50  | 7.00                           | 0.96                           | 2.56 | 16.96              | 1.01                            |  |
|       | B11             | 35-54       | 37.72            | 1.77             | 26.20                          | 8.95                           | 0.91 | 0.05 | 0.92 | 0.79 | 0.30              | 0.50             | 0.00                          | 7.80                          | 14.07            | 99.98                         | 6.50  | 9.00                           | 1.13                           | 2.44 | 11.20              | 2.00                            |  |
|       | B12             | 54-85       | 33.42            | 2.00             | 27.66                          | 10.06                          | 0.52 | 0.07 | 1.11 | 0.30 | 0.20              | 0.50             | 0.70                          | 9.31                          | 13.79            | 99.64                         | 6.50  | 9.50                           | 2.20                           | 2.05 | 8.82               | 1.66                            |  |
|       | Bt21            | 85-210      | 41.03            | 1.77             | 27.70                          | 8.13                           | 0.52 | 0.07 | 0.72 | 0.50 | 0.00              | 0.40             | 0.00                          | 6.54                          | 12.37            | 99.75                         | 10.00 | 13.70                          | 0.96                           | 2.51 | 13.41              | 2.51                            |  |
|       | Bt22            | 210-270     | 36.72            | 1.77             | 27.96                          | 9.04                           | 1.04 | 0.11 | 0.72 | 0.40 | 0.00              | 0.40             | 0.00                          | 7.26                          | 13.74            | 99.16                         | 7.00  | 11.50                          | 5.77                           | 2.22 | 10.79              | 1.85                            |  |
|       | BC              | 270-285     | 40.46            | 2.30             | 25.63                          | 9.69                           | 0.78 | 0.15 | 0.74 | 0.40 | 0.50              | 0.60             | 0.00                          | 7.95                          | 10.82            | 100.02                        | 9.50  | 13.00                          | 7.00                           | 2.67 | 11.09              | 2.14                            |  |
|       | Cx              | 285-+       | 48.01            | 1.14             | 20.62                          | 9.90                           | 0.78 | 0.05 | 1.47 | 0.30 | 0.40              | 0.50             | 0.13                          | 4.71                          | 11.90            | 99.91                         | 5.50  | 6.50                           | 6.47                           | 3.94 | 12.88              | 3.02                            |  |
| III-2 | O               | 0-10        | 44.05            | 2.40             | 22.50                          | 5.73                           | 2.21 | 0.16 | 1.02 | 0.99 | 1.10              | 0.60             | 0.37                          | 4.65                          | 14.58            | 100.36                        | 3.50  | 5.50                           | 2.27                           | 3.32 | 20.43              | 2.85                            |  |
|       | A11             | 10-26       | 46.02            | 1.12             | 25.32                          | 7.30                           | 0.52 | 0.03 | 1.10 | 0.30 | 0.00              | 0.20             | 0.90                          | 4.10                          | 12.63            | 99.58                         | 5.00  | 5.50                           | 3.20                           | 3.08 | 16.76              | 2.60                            |  |
|       | A12             | 26-42       | 42.46            | 1.16             | 27.11                          | 6.74                           | 0.52 | 0.03 | 0.74 | 0.10 | 0.00              | 0.10             | 0.50                          | 5.57                          | 14.47            | 99.50                         | 3.00  | 5.50                           | 2.80                           | 2.65 | 16.74              | 2.29                            |  |
|       | Bt <sub>6</sub> | 42-90       | 44.58            | 2.30             | 26.58                          | 6.56                           | 2.21 | 0.05 | 0.99 | 0.89 | 0.30              | 0.50             | 0.00                          | 3.00                          | 12.02            | 99.98                         | 4.50  | 5.00                           | 3.50                           | 2.84 | 18.06              | 2.40                            |  |
|       | BC <sub>6</sub> | 90-125      | 42.53            | 1.38             | 28.10                          | 8.03                           | 0.63 | 0.04 | 0.18 | 0.24 | 0.60              | 0.20             | 0.49                          | 3.51                          | 13.19            | 99.12                         | 5.00  | 7.00                           | 1.05                           | 2.56 | 14.07              | 2.10                            |  |
|       | Cx <sub>6</sub> | 125-+       | 54.78            | 1.50             | 20.11                          | 7.10                           | 0.30 | 0.08 | 0.22 | 0.61 | 1.80              | 0.90             | 0.46                          | 3.01                          | 8.94             | 99.81                         | 0.60  | 3.50                           | 1.05                           | 4.62 | 20.50              | 3.77                            |  |
| III-3 | A               | 0-10        | 41.66            | 1.88             | 22.72                          | 9.22                           | 0.73 | 0.20 | 0.25 | 0.61 | 1.30              | 1.00             | 0.61                          | 5.29                          | 14.37            | 99.84                         | 7.00  | 3.20                           | 0.78                           | 3.11 | 12.00              | 2.47                            |  |
|       | Bt21            | 10-20       | 44.00            | 1.63             | 20.69                          | 7.72                           | 1.21 | 0.32 | 0.38 | 0.61 | 1.10              | 0.80             | 0.74                          | 3.32                          | 15.78            | 98.30                         | 10.00 | 8.60                           | 0.87                           | 3.60 | 15.14              | 2.91                            |  |
|       | Bt22            | 20-28       | 39.13            | 1.30             | 25.44                          | 9.59                           | 0.49 | 0.32 | 0.23 | 0.37 | 1.00              | 0.80             | 0.71                          | 6.59                          | 13.98            | 99.95                         | 10.00 | 14.60                          | 0.76                           | 2.61 | 10.84              | 2.10                            |  |
|       | Cqm             | 28-42       | 43.00            | 1.25             | 23.66                          | 7.97                           | 0.49 | 0.34 | 0.32 | 0.85 | 1.00              | 0.70             | 0.57                          | 6.80                          | 2.91             | 99.86                         | 13.00 | 11.00                          | 0.87                           | 3.08 | 14.33              | 2.53                            |  |
|       | C               | 42-125      | 46.86            | 1.63             | 22.11                          | 8.69                           | 0.33 | 0.28 | 0.61 | 0.43 | 0.90              | 0.60             | 0.60                          | 5.97                          | 0.86             | 99.87                         | 12.00 | 7.60                           | 0.78                           | 3.59 | 14.33              | 2.87                            |  |
| III-4 | A               | 0-15        | 44.00            | 1.75             | 20.36                          | 8.30                           | 0.77 | 0.08 | 0.42 | 0.79 | 2.40              | 1.10             | 0.73                          | 5.02                          | 14.22            | 99.94                         | 6.00  | 7.60                           | 2.70                           | 3.66 | 14.08              | 2.90                            |  |
|       | Bw              | 15-44       | 44.47            | 0.15             | 24.32                          | 7.97                           | 1.83 | 0.05 | 1.32 | 1.47 | 1.20              | 0.50             | 0.10                          | 11.07                         | 5.06             | 99.57                         | 7.50  | 8.00                           | 2.70                           | 3.06 | 14.64              | 2.53                            |  |
|       | Cqm             | 44-104      | 60.40            | 0.17             | 17.52                          | 7.08                           | 1.83 | 0.03 | 0.64 | 1.53 | 1.90              | 0.80             | 0.05                          | 5.96                          | 2.14             | 100.05                        | 10.60 | 10.00                          | 3.00                           | 5.85 | 22.67              | 4.65                            |  |
|       | C               | 104-+       | 43.11            | 0.17             | 25.39                          | 7.66                           | 1.83 | 0.13 | 0.28 | 0.86 | 0.74              | 0.20             | 0.10                          | 10.55                         | 3.65             | 99.67                         | 3.00  | 5.00                           | 0.50                           | 2.88 | 14.95              | 2.41                            |  |

tienen en promedio de 93.75 y 96.5 % respectivamente, haciendo la anotación que un alto contenido de  $\text{SiO}_2$  es típico de estos materiales.

Sin embargo, conocimientos más recientes indican que no son precisamente los contenidos altos de  $\text{SiO}_2$  total, los causantes de la dureza de los duripanes, sino las formás libres, labiles y la dinámica de la sílice en la solución del suelo (Steinhardt, *et al.*, 1982; Flores, *et al.*, 1992 y Flores, *et al.*, 1996).

#### 8.3.3.3. Oxidos libres.

Steinhardt *et al.*, 1982, sugieren que los óxidos libres ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) son agentes cementantes que constituyen la matriz de las capas endurecidas. Asimismo, Steinhardt y colaboradores (*op cit.*) han comprobado que la  $\text{SiO}_2$  libre se incrementa en los horizontes de los fragipanes.

Para este estudio los contenidos de óxidos libres de Si y de Al representan valores más altos, principalmente en los duripanes y disminuyen en el fragipán. Los óxidos libres de hierro constituyen valores bajos (Tabla 12).

Por otro lado, la suma de los porcentajes de los óxidos libres y los contenidos de arcilla no reflejan el grado de alteración de estos suelos. Los contenidos de arcilla fueron mayores en todos los horizontes de los cuatro perfiles de suelos que los óxidos libres, solamente en el perfil III-4, en su horizonte superior casi se igualan los valores de contenidos de óxidos libres y arcilla. La diferenciación de los contenidos fue mayor en general en los horizontes medios de los cuatro suelos.

#### 8.3.3.4. Microanálisis del cementante.

En la tabla 13, se exponen los porcentajes de los principales óxidos totales detectados en sitios puntuales de las capas endurecidas. Como se observa los porcentaje más altos siempre correspondieron a los óxidos de sílice, en segundo lugar a los de aluminio y en tercero a los de hierro. Circunstancias que, como ya

Tabla 13. Microanálisis del cementante en sitios puntuales de las capas endurecidas

| Compuesto                      | perfil III-1 |       |       |       | perfil III-2 |       |       |       | 1     | perfil III-3 |       |       |       | perfil III-4 |       |  |
|--------------------------------|--------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|--------------|-------|--|
|                                | 1            | 2     | 3     | 4     | 1            | 2     | 3     | 4     |       | 2            | 3     | 4     | 1     | 2            | 3     |  |
| SiO <sub>2</sub>               | 65.89        | 50.74 | 63.00 | 49.43 | 56.24        | 56.67 | 55.64 | 55.51 | 43.24 | 51.50        | 51.46 | 45.74 | 86.64 | 70.37        | 56.62 |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 22.62        | 32.97 | 26.80 | 35.59 | 37.80        | 37.73 | 37.78 | 38.35 | 42.97 | 37.73        | 36.47 | 33.72 | 8.39  | 19.47        | 33.81 |  |
| K <sub>2</sub> O               | 3.20         | 0.22  | 0.67  | 0.27  | 0.00         | 0.01  | 0.08  | 0.13  | 0.40  | 0.45         | 0.65  | 0.09  | 3.40  | 0.70         | 0.21  |  |
| CaO                            | 0.53         | 0.34  | 0.09  | 0.27  | 0.07         | 0.03  | 0.08  | 0.07  | 0.10  | 0.51         | 0.50  | 0.39  | 0.19  | 0.30         | 0.16  |  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.43         | 1.16  | 0.79  | 0.94  | 0.41         | 0.36  | 0.60  | 0.38  | 1.70  | 1.51         | 1.69  | 0.41  | 0.45  | 1.17         | 0.35  |  |
| FeO                            | 5.56         | 13.57 | 7.07  | 10.65 | 4.54         | 3.95  | 5.07  | 4.54  | 11.50 | 8.14         | 8.85  | 16.07 | 0.88  | 7.95         | 8.79  |  |

se ha explicado, señala la abundancia de la sílice e implica principalmente su participación como cementante o formador de arcilla.

El duripán que obtuvo los valores de la SiO<sub>2</sub> total más altos fue el perfil III-4 y el de los más bajos fue el correspondiente al PIII-3. Contrariamente a lo esperado, el PIII-2, obtuvo valores intermedios entre los ya citados. Tal situación confirma, lo ya discutido con anterioridad, que los valores muy altos de óxidos de silicio total no necesariamente indican una mayor cementación de las capas endurecidas.

#### **8.3.4. Análisis mineralógico.**

En la tabla 14, se observan los resultados del análisis mineralógico por difracción de rayos X, de la fracción arcillosa de las capas endurecidas (duripanes y fragipanes) y de todos los horizontes de cada uno de los cuatro perfiles de suelo estudiados.

Cabe hacer el señalamiento que los minerales predominantes son la caolinita y la haloisita o en su forma deshidratada llamada metahaloisita o Haloisita-7Å. Parte de la identificación e impresión de los difractogramas por perfil se realizó en un difractómetro de Siemens D-500, este trabajo solamente se llevó a cabo para los perfiles III-3 y III-4. Como se muestra en el anexo (Capítulos 12. Anexos, páginas 160-161).

En el perfil III-1, la presencia de la caolinita, metahaloisita y goetita se dio en todos los horizontes del perfil, presentándose en menor cantidad los feldespatos, micas, cuarzo, anfíboles y gibbsita. Para el perfil III-2, en todos los horizontes se presentaron la caolinita, metahaloisita y cristobalita. La montmorillonita se encontró en los primeros horizontes estando ausente en los inferiores y volviendo aparecer en el último horizonte del perfil. También aparecieron en menor proporción los minerales goetita, mica y anfíboles.

Tabla 14. Análisis Mineralógico

| PERFIL | HZ               | PROF.   | DIFRACCION DE RAYOS X      |
|--------|------------------|---------|----------------------------|
|        |                  | cm      | Fracción Arcilla           |
| III-1  | A                | 0-35    | Kk, Mh, QC, GI, GE, FD, MI |
|        | B11              | 35-54   | Kk, Mh, GI, QC, FD, GE     |
|        | B12              | 54-85   | Kk, Mh, QC, GE, AM, MI     |
|        | Bt21             | 85-210  | Kk, Mh, GE                 |
|        | Bt22             | 210-270 | Kk, Mh, QC, MT, GE, MI     |
|        | BC               | 270-285 | Kk, Mh, QC, GE, FD,        |
|        | CX               | 285-+   | Kk, Mh, QC, GE             |
| III-2  | O                | 0-10    | Kk, Mh, QC, GE, MI, MT     |
|        | A11              | 10-26   | Kk, Mh, QC, MT, MI         |
|        | A12              | 26-42   | Kk, Mh, QC, MT, AM         |
|        | Bt <sub>2b</sub> | 42-90   | Kk, MT, QC, GE             |
|        | BC <sub>b</sub>  | 90-125  | Kk, MT, QC, GE             |
|        | CX <sub>b</sub>  | 125-+   | Kk, Mh, QC, GE, MT         |
|        | III-3            | A       | 0-10                       |
| Bt21   |                  | 10-20   | HA, QC                     |
| Bt22   |                  | 20-28   | HA, QC, Qz                 |
| Cqm    |                  | 28-42   | HA, QC                     |
| C      |                  | 42-125  | HA, QC, Qz                 |
| III-4  | A                | 0-15    | HA, QC                     |
|        | Bw               | 15-44   | HA, QC                     |
|        | Cqm              | 44-104  | HA, QC, Qz, FD, MT         |
|        | C                | 104-+   | HA, QC, Qz, FD             |

Kk=kaolinita, Mh=metahalloysita, QC=cristobalita, GI=gibbsita, GE=goetita, FD=feldespatos, MI=mica, AM=amfiboles, MT=montmorillonita, Qz=cuarso, HA=halloysita.

Los minerales están en orden decreciente de intensidad.

En el perfil III-3, en el primer horizonte que se presenta a una profundidad de 35 cm, se tienen a la haloisita y la cristobalita, en una proporción de 66% y 33% respectivamente y en menor cantidad el cuarzo y feldespatos potásicos. En los horizontes subsecuentes, existe la presencia de la haloisita y cristobalita en un promedio de 68% y 28% respectivamente con pequeñas cantidades de cuarzo.

En el perfil III-4, en este suelos las proporciones de haloisita y cristobalita fueron mayores, promediando en los primeros horizontes más de 80% y 15% respectivamente, en los dos últimos horizontes; aparecieron en menor cantidad los cuarzos, feldespatos potásicos y la montmorillonita.

La presencia de estos minerales descritos, confirman que son producto de una alteración interna, anterior al aplazamiento de material. Pues existe una secuencia de formación de vidrios volcánicos, caolinita, haloisita o metahalloysita, gibsita, sericita, montmorillonita y clorita. La existencia de cristobalita indica la acción de fluidos calientes en el material.

## 9. GENESIS DE LOS SUELOS, CAPAS ENDURECIDAS Y CLASIFICACION .

### 9.1. Morfogénesis.

La morfogénesis de los suelos del área de estudio se inicia con el interperismo de lavas, conglomerados y brechas adesíticas de los períodos Plioceno y Pleistoceno y que están formadas de tobas y depósitos clásticos de materiales volcánicos (Frías 1960; Ortiz 1977; Flores *et al.*, 1992 y 1996). Estos últimos, con el paso del tiempo, han sufrido un proceso de consolidación y cementación ligera, debido a la presencia de la sílice, derivada tanto de la meteorización lenta y prolongada de feldespatos y minerales ferromagnesianos, así como de la meteorización más rápida de el vidrio volcánico y materiales amorfos (Flach *et al.*, 1969; Flores *et al.*, 1992 y 1996).

### 9.2. Génesis de los suelos.

A partir de tobas, se inició la formación de los suelos, pedogénesis que ha sido interrumpida reiteradamente por aportes sucesivos de piroclastos. Son varios los volcanes que influyeron con sus emisiones, pero el más importante ha sido el Popocatepetl. Lugo-Hubp (1984), estima que la edad del volcán es Pliocénica y su actividad reconocida desde 1347 hasta 1927, con 15 erupciones realizadas en ese período.

Es necesario indicar que Nimlos (1989), menciona que en el Valle de México existen alrededor de 140 volcanes que han realizado emisiones en diferentes tiempos, pero hay que señalar que en la parte sur de la cuenca del valle de México Lugo-Hubp (*op cit.*), indica la existencia de mas de 300 volcanes cuantificados entre jóvenes y antiguos, y que probablemente existan otros mas que es difícil su localización por la actividad volcánica que se ha registrado en el área y que a provocado que se sobrepongan los materiales provenientes de distintos centros de erupción.



### **9.3. Formación de las capas endurecidas.**

Una vez formados los suelos, resulta factible plantear, hipotéticamente, para el caso de la formación del fragipán, como un resultado de la compactación producida por el peso de la nieve. Esto implica la presencia de un evento catastrófico como la periglaciación, lo que resulta factible para el área, ya que en el último período glacial, etapa tardía de la glaciación Wisconsiniana, estimada entre 11,000 y 25,000 años, fueron cubiertas de nieve las altas montañas de México, entre ellas el Ajusco, la Sierra Nevada y el volcán de la Malinche (Lugo-Hubp *op cit.*),

Es de señalarse, que los estudios de Ortiz (*op cit.*) sobre el Glacis de Buenavista, se fundamentan en los efectos morfoclimáticos posteriores al vulcanismo del Plioceno superior es decir en las épocas glaciales del Cuaternario con el último Periodo glacial( Wisconsin), que afectaron la sierra de Zempoala que forma parte de las estribaciones meridionales del Ajusco. (Lugo-Hubp *op cit.*).

La acción de la glaciación en los suelos se pudo reflejar en la compactación de los mismos por efecto del peso y provocar la lixiviación de los minerales de los mismos como es el caso de la sílice proveniente de los materiales piroclásticos y principalmente de los vidrios volcánicos que son abundantes en el área.

En este estudio, se descarta que la compactación sea afectada por los procesos de expansión y contracción de las arcillas, principalmente la montmorillonita, que fue detectada en el análisis mineralógico en pequeñas cantidades. Estos procesos han sido considerados, según el USDA (1988), como una forma probable de compactación del fragipán. Otra alternativa de la compactación de los suelos, probablemente sería debido al volumen superpuesto de materiales piroclástico, aparentemente en horizontes emplazados en varias fases de un mismo evento volcánico.

Después de la compactación, hubo efectos severos de procesos erosivos por excesos de agua que se originaron por los deshielos, así como por la lluvia natural que prevaleció en la zona. Heine (1973), señalado por Ortiz (1977),

menciona que con la última retirada de los glaciales se presentaron fuertes los cambios climáticos.

Ortiz (*op cit.*) opina que es muy probable que a partir de este cambio se conduce a un proceso de desertificación, por la remoción de abundante derrubios aislados en las altas montañas, como producto o herencia de lo que señalo como sistema de erosión periglacial.

La erosión del suelo se manifiesta con la pérdida severa de todos los horizontes del suelo dando motivo a la exposición de las capas endurecidas. Estos eventos erosivos pueden apreciarse en la actualidad. No obstante, los procesos de disgregación y alteración continúan, tanto a partir las capas endurecida con el *solum* que le cubre, como la capa expuesta.

Las capas endurecidas conocidas como duripanes son constituidas por procesos de cenizas andesíticas, la aparición de materiales piroclásticos ricos en compuestos de sílice cementado, derivado de vidrios volcánicos y materiales amorfos (Flach *et al.*, 1969, Flores *et al.*, 1992 y 1996 ). En la solución del suelo, el material silicificado es transportado de los horizontes superiores a los inferiores, esto generalmente ocurre cuando se tiene el periodo de lluvias, que si ocurre en la zona de estudio por su condición climática ya descrita.

La existencia de grandes cantidades de arcilla en los perfiles de suelo estudiados, tiende de alguna manera a cubrir las partes medias de los horizontes, obstruyendo el movimiento del agua hacia los horizontes mas inferiores procurando posteriormente la acumulación de los materiales piroclásticos y de los propios minerales arcillosos (Flores *et al.*, 1992 y 1996).

Cuando el período de lluvias tiende a desaparecer, la sílice que esta atrapada entre las partículas de los minerales arcillosos, tiende a cementar. Lo anteriormente descrito confirma que los duripanes del área de estudio tienden a tener un origen ígneo con aportaciones pedológicas secundarias, ya que el fenómeno de iluviación de arcilla es constante. En la figura 32, Flores *et al.*, (1996) demuestran una posible secuencia de la génesis de los suelos y las capas endurecidas en el estado de Morelos.

#### **9.4. Caracterización taxonómica de los suelos.**

Apoyados en los resultados obtenidos de las propiedades morfológicas de campo, físicas, químicas y mineralógicas de los suelos, así como las condiciones del área como las climatológicas, vegetación, topográficas, material parental y su interacción a través del tiempo, se determinaron los suelos de acuerdo a las siguientes clasificaciones:

##### **9.4.1. Clasificación FAO-UNESCO (1994).**

Con base a esta clasificación se consideran a los suelos como Luvisoles Crómicos, por contener un horizonte B Argílico de color pardo intenso a rojo, sin un horizonte Albico.

##### **9.4.2. Soil Taxonomy (1994).**

De acuerdo a esta clasificación, los suelos del perfil III-1, son de textura francamente arcillosa que se conserva y que no varían en menos del 10% en todo el perfil del suelo, esto se puede interpretar como un suelo muy maduro y probablemente muy antiguo (Tabla 4 ).

Su saturación de base en el epipedon es menor al 80% y su capacidad de intercambio catiónico oscila de moderada a baja. Ambas características implican y concuerdan con la existencia de arcilla de relación laminar de 1:1 y además de una posible desbasificación y lavado (Tabla 7 ) y (Tabla 14 ).

Las cantidades de aluminio intercambiable son altas, por lo que la saturación de bases es afectada así como la capacidad de intercambio catiónico efectiva son menor que la reflejada en los análisis efectuados (Tabla 7 ).

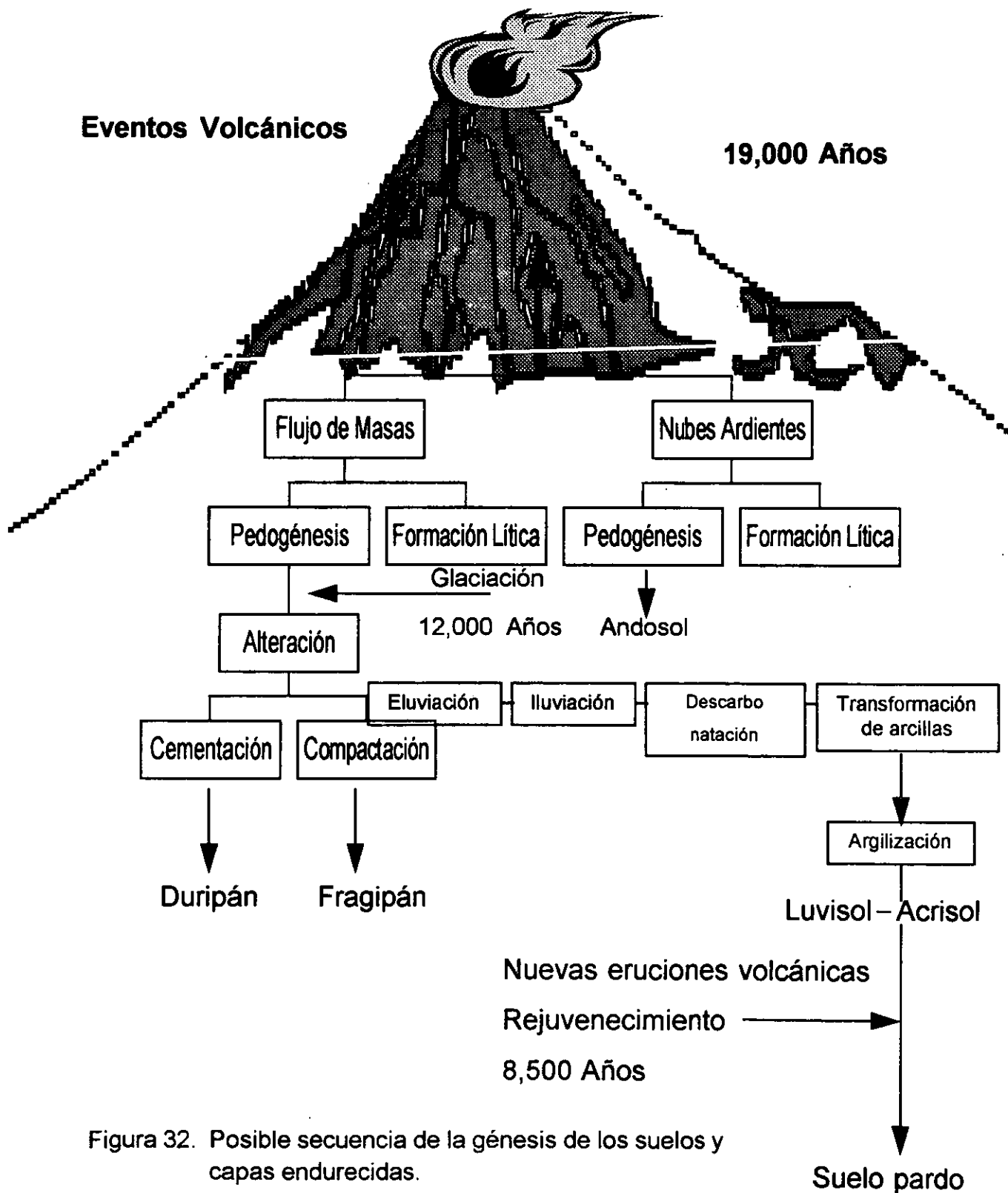


Figura 32. Posible secuencia de la génesis de los suelos y capas endurecidas.  
Modificado de Flores *et al.* 1996.

Los colores rojizos de las muestras del suelo seco y húmedo denotan un alto grado de interperismo y de acuerdo a **Soil Taxonomy (1994)**, las características de estos suelos los ubican dentro del orden de los Alfisoles suborden Udalfs y por el Gran Grupo Fragiudalfs, por contar con un horizonte de fragipán dentro de su perfil.

Para el PIII-2, este perfil presenta la presencia de 2 suelos cíclicos con contraste textural abrupto a 42 cm de profundidad de acuerdo a Soil Taxonomy, se sugiere la presencia de una discontinuidad. Según observaciones de campo, el material que ocupa los 42 cm de profundidad, pueden ser cenizas volcánicas o materiales piroclásticos muy interperizados que se fueron depositando sobre un suelo Argílico descapitado. Es decir en este perfil, se dieron los fenómenos de erosión y depósito del suelo típicos de un Fragiudalfs (Suelos Policiclicos)(Tabla 4 ).

Este suelo queda comprendido dentro del orden de los Alfisoles por tener las características descritas y dentro del suborden Udalfs, que se caracteriza por contar con clima húmedo la mayor parte del año y por el Gran Grupo Fragiudalfs, por contar con un horizonte de fragipán dentro de su perfil.

El PIII-3, este perfil queda comprendido dentro de los Alfisoles dentro del suborden Ustalfs y en el Gran Grupo durustalfs, por contener dentro de su perfil una capa endurecida (Cqm)( Tabla 4. continuación).

Para el PIII-4, se caracteriza por ser un suelo derivado de material coluvial-aluvial que es remanente de una zona muy altamente erosionada (90% de su superficie).

Sus características morfológicas indican la presencia de un horizonte B Cambico que se localiza a los 15 y 44 cm de profundidad, que le sobryace una capa de 15 cm de espesor de textura que se observa en la tabla 4 (Continuación), con esta información se considera dentro del orden de los Inceptisoles suborden Ocrepts y con la presencia de un duripán es un Durocrepts.

## 10. CONCLUSIONES.

Con fundamento en los resultados obtenidos de las pruebas físicas, químicas, mineralógicas, de infiltración de los suelos y capas endurecidas, así como de pruebas de resistencia de materiales endurecidos, verificaciones de campo y con el apoyo de la literatura sobre el tema, se pueden establecer las conclusiones siguientes:

- El apoyo con la teledetección permitió, detectar la presencia de las capas endurecidas con un buen porcentaje de confiabilidad.
- El índice de desarrollo relativo de la clasificación morfológica de campo, coadyuvó a determinar el desarrollo de los suelos del área de estudio, clasificándolos como medianamente desarrollados.
- Los contenidos de arcilla de las capas endurecidas están en el intervalo reconocido para estos horizontes. La mayor concentración se alcanza en los horizontes de iluviación de los PIII-1 y PIII-2, que presentaron un horizonte Bt, indicativo de los altos contenidos de arcilla. En el PIII-3 se identificó un Bt22 con buen contenidos y el PIII-4 fue un Bw incipiente que tuvo menor cantidad de arcilla.
- Los valores de esfericidad y redondez de las partículas minerales nos demuestra que son consecuencia del modo y medio de transporte. La existencia de una mayor cantidad de partículas con baja esfericidad y redondez subangular y angular que es una granulometría típica de materiales piroclastos, se considera que los granos deben su forma a los depósitos *in situ* (tefra) y consecuentemente, a cierto transporte eólico, aluvial o coluvial y procesos de alteración moderada.
- Los grupos de arenas muy finas y arenas finas constituyeron la mayor parte de la arena total en todos los perfiles, siendo poco significativa la presencia de arenas gruesas.

- Como consecuencia de la compactación y cementación que presentaron las capas endurecidas, el espacio poroso se redujo y causó mayor resistencia al movimiento del agua en el proceso de infiltración. Las capas endurecidas presentaron los valores mas bajos, demostrando su alta contribución a la erosión de los suelos por el creciente movimiento lateral del agua cuando contacta con la capa endurecida.
- La densidad aparente se incrementa a mayor profundidad, hasta alcanzar los valore mas altos en las capas endurecidas. La porosidad total es inversamente proporcional a la densidad aparente. El PIII-2, presentó los valores mas altos de densidad aparente.
- Los valores de conductividad hidráulica fueron mayores en los suelos que en las capas endurecidas.
- Las capas endurecidas de los perfiles III-3 y III-4 no sufrieron colapso dentro del agua, aspecto que coincidió con la resistencia a compresión no confinada, donde requirieron un esfuerzo mayor para su fractura, correlacionándose con mayor contenido de materiales silícicos. La muestra de las capas endurecidas de los perfiles III-1 y 2, que corresponde a un fragipán, presentaron una cementación débil, donde el cementante es sílice y su fracturas quedaron comprendidas dentro de la clasificación como débilmente cementado.
- Los niveles de capacidad de intercambio catiónico, pH, aluminio intercambiable, saturación de bases,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ , materia orgánica y relación carbono/nitrógeno que fueron detectadas, son congruentes con el desarrollo de los suelos estudiados.
- Las pérdidas y ganancias de óxidos totales de los horizontes meteorizados, en relación con la roca basal, manifestaron condiciones de alteración moderada; lo cual se confirma en las relaciones moleculares resultantes y la presencia de  $Al^{3+}$  intercambiable. Las grandes cantidades de  $Al_2O_3$  en el

cementante del duripán indica la presencia de arcilla, de neoformación, aunque también debido a su iluviación.

- Los minerales secundarios dominantes, producto de la alteración de materiales volcánicos bajo condiciones de clima semicálido y templados subhúmedos fueron la caolinita y la metahalosita. Minerales identificados dentro de los suelos derivados de cenizas volcánicas.
- Los suelos se originaron apartir de tobas y depósitos clásticos. La compactación del suelo, hipotéticamente, fue causada por el peso de la nieve en el periodo de glaciación. Cuando se retiró la nieve, eventos erosivos severos causaron la pérdida de horizontes completos e incluso de todo el *solum*. Desde esa época hasta la actualidad, los procesos de disgregación y alteración continúan en los suelos y en las capas endurecidas.
- Otra alternativa de la compactación de los suelos, probablemente seria debido al volumen superpuesto de material piroclástico, aparentemente en horizontes emplazados en varias fases de un mismo evento volcánico. El duripán es de origen ígneo con aportes pedogénéticos secundarios.
- Los suelos son clasificados como Luvisoles Crómicos de acuerdo a la clasificación FAO-UNESCO (1994).
- Soil Taxonomy (1994), clasifica a los perfiles PIII-1 y 2 como Alfisoles del Gran Grupo Fragiudalfs, al PIII-3 como Durustalfs y al PIII-4 queda comprendido dentro del orden de los Inceptisoles, suborden Ocrepts y del Gran Grupo Durocrepts.



**11. LITERATURA CITADA.**

1. Acevedo, S.O. A., y Flores, R.D., 1997. Efecto de especies vegetales en la agregación y disgregación en dos tipos de tepetates en el Estado de México, en condiciones de invernadero. III Simposio Internacional sobre suelos Volcánicos endurecidos, Quito, Ecuador. p. 174-184.
2. Acevedo, S.O. A., 1998. Morfogénesis de suelos con tepetates de un área del Estado de México y su incorporación al proceso productivo. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. En proceso.
3. Adame, M. S., 1997. Evaluación ex-post del proyecto de rehabilitación de suelos en la cuenca del río Texcoco. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México. 188 p.
4. Aguilera, H. N., 1969. Geographic distribution and characteristics of volcanic ash soil in México. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Centro de Enseñanza e Investigación. Instituto Interamericano de Ciencias y Agricultura de la O.E.A. Turrialba, Costa Rica. p.12.
5. Aguilera, H. N., 1989. Tratado de edafología de México. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 222 p.
6. Arias, R.H.M., y Figueroa, S. 1991. La ecuación univeral de pérdida de suelo en la cuenca del Río Texcoco. *In* XIV Congreso Nacional Latinoamericano y II Congreso Cubano de la Ciencia del Suelo. La Habana, Cuba. p.12-17.
7. Arias, R.H.M., 1992. Rehabilitación de tepetates: una alternativa para la producción agropecuaria y forestal. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 309-317.
8. Arias, R.H.M., Miranda, M.E., y Gabriels, D., 1992. Dinámica de la erosión en tepetates roturados. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 371-378.
9. Alvarez, S.J.D., Ferrera, C.R., y Zebrowski, C., 1992. Análisis de la microflora asociada al manejo agroecológico en recuperación de tepetates. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 419-424.

10. Avila, H.M., 1963. Recuperación de suelos erosionados de Chapingo, México, con plantaciones forestales. Tesis de maestría. Colegio de posgraduados. Chapingo, México.
11. Baez, A., Marquez, A., y Prat, C., 1995. Rehabilitación agrícola de un tepetate café T3 caso 1: resultados agronómicos en 93 y 94. Memoria XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Cd. Victoria, Tamaulipas, México. p. 138.
12. Baumann, J., Werner, G. Muñoz, N.H., Vera, R.A., y Flores, F.G., 1992. Mediciones preliminares de la erosión hídrica en el bloque de Tlaxcala, México. Primer simposio internacional de suelos volcánicos endurecidos Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 347-354.
13. Baver, L.A., y Gardner, W.R., 1980. Física de suelos. UTEHA, México. 529 p.
14. Bilzi, A.F., y Ciolkosz, E.J., 1977. A field morphology rating scale for evaluating pedological development: Soil Science, v 124, p. 45-49.
15. Birkeland, P.W., 1974. Pedology, weathering and geomorphological research. Oxford, University Press. New York. 285 p.
16. Black, C.A., Evans, D.D., Haite, J.L., Ensminger, L.E., and Clark, F.E., 1965. Methods of soil analysis. Part 1 Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Am. Soc. of Agron., Inc. Publisher, Madison, Wisconsin, U.S.A. 770 p.
17. Blachar, R.W., Edmonds, C.R., and Bradford, J.M., 1978. Root Growth in cores formed from fragipan and B2. Horizons of Hobsons soil. Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 42: 437-440.
18. Blank, R.R., and Fosberg, M.A., 1990. Duripans of Idaho, USA: *In situ* alteration of eolian dust (loss) to an opal-A/x-ray amorphous phase. Geoderma. 1991, 48:1-2, 131-149.
19. Bocco, G., and Garcia, O. F., 1992. Researching gully erosion in México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Journal of Soil and Water Conservation. 47: 5, 365-367.
20. Boersma, L., 1965. Field measurement of hydraulic conductivity above a water table, in Black, C.A., Ed., Methods of soil analysis; part 1, Physical and mineralogical, including statistics of measurement and sampling: Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, p. 234-252.

21. Boul, S.W., Hole, F.D., y McCrackern, R.J., 1989. Génesis y Clasificación de suelos. Ed. Trillas. 417 p.
22. Bouyoucos, G.L., 1963. Directions for making mechanical analysis of soil by hydrometer method. *Soil Science*, 42:25-30.
23. Bradford, J.M., and Blanchar, R.W., 1980. The Effect of Profile Modification of a Fragiudalf on Water Extraction and Growth by Grain Sorghum. *Soil. Sci. Am. J. Vol. 44:374-378.*
24. Buchanan, F., 1807. A journey from madras throught the countries of mysore, canara and malabar. Vol. 2:436-460. East India Co., London.
25. Camargo, R.E.C., y Guido, A.I., 1987. Roturación y trituración de tepetate en el Valle del Mezquital, su efecto en la agricultura bajo condiciones de riego in Ruiz, F.J.F. *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH, México., p. 143-155.*
26. Carlisle, F.J., Knox, E.G., and Grossman, R.B., 1957. Fragipan Horizons in New York Soils: I, General Characteristics and distribution. *Soil Sci. Soc. Americ. Proc. Vol. 21: 320-321.*
27. Cervantes, B.J.F., 1983. Génesis, morfología y clasificación de los suelos de la cuenca de México. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 441p.
28. Cline, M.G., 1952. "Soil classification en the United States, observation and conclusions during sabbatie leave" Mimeo. Rept. Cornell Univ., Ithaca, New York.
29. Coleman, N.T., Weed, S.B., y McCracken, R.J., 1959. Cation-exchange capacity and exchangeable cations in piedmont Soils of North Carolina: *Soil Science Society of America Proceedings Vol. 23, p. 146-149.*
30. Creutzberg, D., Kauffman, H.J., Bridges, E.M., and Del Posso, M.G., 1990. Micromorphology of "cangahua". A cemented subsurface horizon in soils from Ecuador, pp 367-372 *In* : L. A. Douglas(ed). *Soil micromorphology: a basic and applied science. International Working Meeting on Soil Micromorphology, San Antonio, Tex., proceedings, p. 637-372.*
31. Dabney, S.M. and Selim, H. M., 1987. Anisotropy of a fragipan soil: Vertical Vs. Horizontal Hydraulic Conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 51: 3-6*

32. Day, P.R., 1965. Particle fractionation and particle-size analysis, in Black, C.A., Ed., *Methods of soil analysis; part 1, Physical and mineralogical, including statistics of measurement and sampling*: Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, p. 545-56.
33. De Cserna, Z. y Fries, C. Jr., 1981. Hoja Taxco 14Q-h(7), con resumen de la geología de la hoja Taxco, Estados: Guerrero, México y Morelos: Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Carta Geológica de México, Serie de 1:100,000, mapa con texto explicativo al reverso.
34. Dubroeuq, D., Quintin, P., Zebrowski, C., 1989. Los tepetates de origen volcánicos en México. Esquema preliminar de clasificación. *Terra* 7(1):3-12
35. Dubroeuq, D., 1992. Los tepetates de la región de Xalapa, Veracruz (México). Un endurecimiento de origen pedológico. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. *Terra* Vol. 10 número especial. p 233-240.
36. Duchaufour, Philippe, 1984. *Edafología. 1. Edafología y Clasificación*. Masson, S.A., España. 493 p.
37. Escobar, R., 1981. *Enciclopedia agrícola y conocimientos afines*. Tres Tomos. 1006 p.
38. Estrada B.J.W., y Ortiz, S.C.A., 1982. Planos de erosión de suelos en México. Su representación en escala 1:8'000,000 obtenido por la metodología de FAO 1979. *Geografía Agrícola* 3.23-27.
39. Etchevers, B.J.D., Cruz, H.L., Mares, A.J., y Zebrowski, C., 1992. Fertilidad de los tepetates: I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. *Terra* Vol. 10 número especial. p. 379-384.
40. Etchevers, B.J.D., Perez, M.A., y Navarro, G.H., 1997. Dinámica de la materia orgánica y el N en tepetates habilitados para la producción agrícola. III Simposio Internacional sobre suelos Volcánicos endurecidos, Quito, Ecuador. p 213-224.
41. FAO, 1988. *Soil map of the world, revised legend*: Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, International Soil Reference and Information Centre, World Soil Resources Report 60, escala 1:5'000,000, mapa y texto de 119 p.

- 42.FAO-UNESCO, 1994. Soil map of the world, revised legend: Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, International Soil Reference and Information Centre, World Soil Resources Report 60, escala 1:5'000,000, mapa y texto de 190 p.
- 43.Fanning, O.S. and Fanning, B.M.C., 1990. Soil morphology, genesis and classification. John Wiley and Sons. 395 p.
- 44.Ferrera, C. R., 1992. Papel de los microorganismos en la recuperación de suelos marginales. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 408-414
- 45.Fechter, E.U., Muñoz, T.P. y Vera, R.A., 1995. Aportación para el dictamen físico del suelo sobre la calidad y la sostenibilidad de rehabilitaciones de suelos volcánicos endurecidos en el altiplano de México. Memorias XXVI, Congreso Nacional de la Ciencias del Suelo. Cd. Victoria Tamaulipas, México. p. 140.
- 46.Fitzpatrick, E.A., 1984. Suelos, su Formación, Clasificación y Distribución. CECSA. México. 430 p.
- 47.Flach, K.W., Nettleton, W.D., Gile, L.H., and Cady, J.G., 1969. Pedocementation-Induration by silica, carbonates and sesquioxides in the Quaternary: Soil Science, Vol. 107, No.6, p. 442-453.
- 48.Flores, R.D., Alcalá, M.J.R., González, V.A., y Gama, C.J.E., 1990. Fragipanes de origen volcánico. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposium Nacional sobre Degradación del Suelo, 1, México, D.F., Memoria, p. 58-59.
- 49.Flores, R.D., González, V.A., Alcalá, M.J.R., Gama, C.J.E., 1991. Los Tepetates. Revista de Geografía.Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.3(4):37-41.
- 50.Flores, R.D., Alcalá, M.J.R., González, V.A., y Gama, C.J.E., 1992. Suelos con fragipán de origen volcánico en clima semicálido y subhúmedo, el caso del noreste del Estado de Morelos, México. Rev. del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. 10(2):151-163.

51. Flores, R.D., González, V.A., y Marañón, G.G., 1995. Estudios morfogenéticos de Suelos con tepetates del noreste del Estado de Morelos, México. Memorias XXVI, Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Cd. Victoria Tamaulipas, México. p. 7.
- Flores, R.D., Alcalá, M.J.R., González, V.A., y Gama, C.J.E., 1996. Duripans in subtropical and temperate subhumid climate in the transmexican volcanic belt., *Revista Mexicana de las Ciencias Geológicas*. Vol. 13, No.2. p. 228-238.
52. Fries, C.Jr., 1960. Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, Region central meridional de México. Boletín No. 60 Instituto de Geología, UNAM. México
53. Fries, C.Jr., y Ramírez, J.L., 1965. Hoja Cuernavaca 14Q-h(8), con resumen de la geología de la hoja Cuernavaca, Estados: Morelos, México, Guerrero y Puebla: Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Carta Geológica de México, Serie de 1:100,000, mapa con texto explicativo al reverso.
54. García, E., 1964. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana): México, D.F., Offset Larios. 3a Ed. Corregida y aumentada.
55. García, E., 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana): México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, 246 p.
56. García, E.A., 1961. Estudios de los suelos tepetatosos y las posibilidades de recuperación agrícola. Tesis de Licenciatura, Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México.
57. García, L., 1983. Diagnóstico sobre el estado actual de la erosión en México. *Terra* 1(1): 11-14.
58. Geissert, D., Rossignol, J.P., Campos, A., Gutiérrez, R., y Barrera, N., 1987. La morfoedafología en la ordenación de los paisajes rurales, conceptos y primeras aplicaciones en México. INIREB-ORSTOM, Xalapa, México.
59. Gile, L.H., Peterson, F.F., and Grossman, R.B., 1965. The K Horizon: A master soil horizon of carbonate accumulation. *Soil Sci.* Vol. 90: No. 2. 74-82.

60. González, R.J.M., 1981. La producción de maíz para grano y forraje en tepetates recuperados mediante una práctica mecánica sencilla. Tesis profesional, Depto. De Zootecnia. UACH., Chapingo, México.
61. González, R.J.M., 1984. Introducción y evaluación de gramíneas y leguminosas establecidas en áreas degradadas para su uso en conservación y producción de forrajes en sistemas asociados con maíz. Tesis maestría, Centro de Edafología, Colegio Postgraduados. Chapingo, México.
62. González, V. A., 1996. Morfogénesis de suelos con tepetates de origen volcánicos con clima templado subhúmedo en el Estado de Morelos. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 73 p.
63. Goudie, A., 1973. Duricrusts in subtropical landscapes Oxford Clarendon Press, 174 p.
64. Grossman, R.B., and Carlisle, F.J., 1969. Fragipan soils of the eastern United States. *Advance of Agrom.* 21:237-279.
65. Guerra, C.V., y Garzón, C.C.E., 1992. Crecimiento de cinco especies forestales y su relación con la recuperación de los suelos en Tlaxcala. Primer Simposio Internacional de Suelos volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. *Terra Vol. 10 número especial.* p. 444-450.
66. Guerrero, G.E., Luna, M.J.L., Caballero, O.E., 1992. Distribución de los tepetates de la República Mexicana escala 1:4' 000,000. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. *Terra Vol. 10 número especial.* p. 131-136.
67. Hashimoto, Y., and Jackson, M.L., 1960. Rapid dissolution of allophane and kaolinite-halloysite after dehydration: New York Pergamon Press, p. 102-113.
68. Head, K.H., 1984. Manual of soil laboratory testing; tome 1, Soil classification and compaction tests: Londres, Plymouth Pentech Press. 267 p.
69. Hernández, X.E., 1987. Etnobotánica de Tlaxcala, in Ruíz-Figueroa, J.F., Ed., Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH., México. p. 1-7.

70. Hessmann, R., 1992. Micromorphological investigation on "tepetates" formation in the "tobas" sediments of the State of Tlaxcala (México). Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 145-150.
71. Hidalgo, M.C., Quintin, P., y Zebrowski, C., 1992. La cementación de los tepetates: estudio de silicificación. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 191-201.
72. Hidalgo, M.C., 1995. Las arcillas y las propiedades del fragipán de los tepetates del Valle de México. Memorias XXVI, Congreso Nacional de la Ciencias del Suelo. Cd. Victoria Tamaulipas, México. p. 6.
73. Instituto Nacional de Capacitación del sector Agropecuario A.C., 1982. Diccionario agropecuario de México. Instituto Nacional de Capacitación del Sector Agropecuario A.C., (INCA RURAL). 402 p.
74. Jackson, M.L., 1970. Análisis químico de suelos, 2a Ed.; Barcelona, España. Editorial Omega, 662 p.
75. Johnson, W.M., McClelland, J.E., McCaleb, S.B., Ulrich, R., Harper, W.G., and Hutchings, T.B., 1960. Clasification and description of soil pores: Soil Science, Vol. 89, p. 319-321.
76. Karathanasis, A.D., 1987. Thermodynamic Evaluation of Amorphous Aluminosilicates Binding Agents in fragipans of Western Kentucky. Soil Science Society of American Journal. Vol. 51: 819-824.
77. Kostyakov, A.N., 1932. On the dynamics of the coefficient of Water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purpose of amelioration (en ruso): Gramingen, Holanda, International Society of Soil Science, 6th Commission, transactions, p. 17-21.
78. Krauskopf, K.B., 1979. Introduction to geochemistry. Tokio, Mc Graw-Hill. Kogakusha, 617p.
79. Kunse, G.W., 1965. Pretreatment for mineralogical analysis, in Black, C.A., Ed., Methods of soil analysis; part 1, Physical and mineralogical, including statistics of measurement and sampling: Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, p. 568-577.
80. Larousse, 1986. Diccionario Pequeño Larousse Ilustrado. 1663 p.



81. Laumplug, G.W., 1907. The geology of the Zambezi basi around the Batoks George (Rhodesia). Geol. Soc. London Quart.
82. Lugo-Hubp, J., 1984. Geomorfología del sur de la cuenca de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Variá, Tomo 1, Núm. 8, 95 p.
83. Llerena, V.F.A., y Sánchez, B.B., 1992. Recuperación de tepetates en la vertiente oriental del Valle de México. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 302-308.
84. Matias C.S., Gomez C.G., Ferrera, C.R., Quintero, L.R., y Santizo, R.J.A., 1992. *Azolla caroliniana* como biofertilizantes nitrogenados sobre el desarrollo de *Eysenhardtia polystachya* en tepetates. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 415-424.
85. Matias, C.S., and Ferrera, C.R., 1995. Determination of microbial biomass and its fluctuation on base of agroecological management of tepetate. Memorias del "XV International Congress of Soil Science" Acapulco, México p. 249-250.
86. Marañón, G.G., 1994. Caracterización de los suelos con tepetates y su relación con la vegetación en el municipio de Tetela del Volcán, Edo. de Morelos. Tesis de Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, 90 p.
87. Márquez, A., Zebrowski, C., y Navarro, H., 1992. Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 465-473.
88. Meixner, R.E., and Singer, M.J., 1981. Use of field morphology rating system to evaluate soil formation and discontinuities. Soil Sci. Vol. 131. No. 2:114-123.
89. Miehlich, G., 1984. Chronosequenzen und anthropogene Veranderugen andesitischer vulkanascheboden in drei Klimastufen eines randtropischen Gebiges (sierra nevada México). Habilitation thesis, Hamburg. 417 p.

90. Miehlich, G., 1992. Formation and properties of tepetate in the highland of México. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 137-144.
91. Morfin, L.L., y Camacho, M.F., 1987. El palo dulce *Eysenhardtia polystachya*, (Ortega) Sarg., una alternativa para la explotación forrajera de áreas tepetatosas, in Ruíz-Figueroa, J.F., Ed., Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 192-198.
92. Munsell, 1990. Soil Color Charts. Edition Munsell Color Company. Inc. Baltimore, Maryland, 21218. U.S.A.
93. Muñoz, T.P., Fechter, E.U., Vera, R.A., 1995. El enraizamiento de cuatro diferentes cultivos de tepetates rehabilitados en Tlaxcala/México. Memorias XXVI, Congreso Nacional de la Ciencias del Suelo. Cd. Victoria Tamaulipas, México. p. 139.
94. Nava, V.R., Sánchez, J., Olvera, O.Y., y Leyte, A.R., 1992. Rehabilitación del tepetate mediante el manejo tradicional en Tlaxcala-México. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 460-464.
95. Navarro, G.H., y Zebrowski, C., 1992. Análisis agronómico comparativo en tepetate. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 450-458.
96. Navarro, G.H., y Benitez, D., 1997a. Rendimiento de maíz-frijol en un tepetate en el segundo año de rehabilitación agrícola. III Simposio Internacional sobre suelos Volcánicos endurecidos, Quito, Ecuador. p. 279-286.
97. Navarro, G.H., y Flores D., 1997b. Manejo agronómico diferencial de la asociación maíz-haba en tepetate de quinto año de uso agrícola. III Simposio Internacional sobre suelos Volcánicos endurecidos, Quito, Ecuador. p. 287-295.
98. Nettleton, W.D., McCracken, R.J., and Daniels, R.B., 1968. Two North Carolina Coastal plain catenas: II. Micromorphology, Composition and Fragipan Genesis. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 32: 582-587.

99. Nimlos, T.J., 1987a. La nomenclatura de horizontes endurecidos en suelos de cenizas volcánicas, *in* Ruíz-Figueroa, J.F., Ed., *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*: Texcoco, Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 10-16.
100. Nimlos, T.J., y Ortiz, S.C., 1987b. Tepetate rock mat. *Journal of Soil and Water Conservation* 42(2):83-86.
101. Nimlos, T.J., 1989. The density and strength of mexican tepetate (Duric materials). *Soil Science* 147(1):23-27.
102. Nimlos, T.J., and Hillery, A.P., 1990. The strength/moisture relations and hydraulic conductivity of mexican tepetate. *Soil Science* 50(1):425-430.
103. Olson, K.R., 1985. Identification of fragipans by means of mercury intrusion porosimetry. *Soil Science Society of American Journal*, Vol. 49: 406-409.
104. Ortiz, P.M.A., 1977. Estudio geomorfológico del Glacis de Buenavista, Estado de Morelos. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Bol. 8, 25-40.
105. Ortiz, V.B., y Ortiz, S.A., 1980. Edafología. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. 331 p.
106. Pacheco, L.M.C., 1979. Cartografía y caracterización mineralógica de los tepetates del Oriente del Valle de México. Tesis. UACH. Chapingo, México. 58 p.
107. Pacheco, L.M.C., y Estrada-Berg, W.J., 1987. Cartografía y caracterización mineralógica de los tepetates del oriente del Valle de México, *in* Ruíz-Figueroa, J.F., Ed., *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*: Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 31-37.
108. Pedraza, C.E., Rodríguez, F.C. y Fierros, G.A.M., 1987. Establecimiento de cinco especies forestales en tres tipos de tepetate de la zona de tequesquahuac a Coatepec, Estado de México, *in* Ruíz-Figueroa, J.F., Ed., *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 128-140.
109. Peña, B.V., 1987. Importancia de la mycorriza en el establecimiento de plantaciones forestales en tepetates, *in* Ruíz-Figueroa, J.F., Ed., *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 119-125.

110. Peña, P.H., y Zebrowski, C., 1992. Los suelos y tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 151-155.
111. Pimentel, B.L., 1987. Importancia de la roturación de los tepetates en plantaciones forestales. *in* Ruíz-Figueroa, J.F., Ed., Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 199-211.
112. Pimentel, B.L., 1992. Cómo hacer a los tepetates productivos. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 293-301.
113. Powers, M.C., 1953. A new roundness scale for sedimentary particles: Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 23, p. 117-119.
114. Prasad, K.G., and Perkins, H.F., 1975. *In situ* hydraulic conductivity of a Fragipan soil in the southern coastal plains. Soil Sci. Vol. 126. No. 5: 263-268
115. Prat, C., y Quantin, P., 1992. Origen y génesis del tepetate. Horizonte endurecidos de suelos volcánicos de la región Centro-Pacífico de Nicaragua. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 266-282.
116. Quantin, P., 1992. Endurecimiento de materiales volcánicos piroclásticos en América Latina: Proceso geológicos y edafológicos. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial. p. 24-33.
117. Quiñonez, G. H., 1987. La química del silicio. *in* Ruiz-Figueroa, J.F., Ed., Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 19-128.
118. Rey, C.J.A., 1979. Estimación de la erodabilidad de los tepetates en la cuenca del río Texcoco en base al factor K. Tesis de Maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 145 p.

119. Rey, C.J.A., 1987. Evaluación de la construcción de zanjas trincheras para el control de la erosión en la zona de tepetates de la zona de San Pablo Ixayoc, Estado de México, *in* Ruiz-Figueroa, J.F., Ed., *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 180-181.
120. Rojas, R.T., y Sánchez, W.T., 1985. Historia de la agricultura en época prehispánica. Siglo XVI. Colección Biblioteca del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) México. D.F.
121. Rossignol, L.P., y Campos, A.C., 1987. Los tepetates de la zona centro de Veracruz, *in* Ruiz-Figueroa, J.F., Ed., *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 38-49.
122. Ruiz-Figueroa, J.F., 1987. *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. 222 p.
123. Rzedowski, J., 1978. *La vegetación de México*. Limusa, México. 432 p.
124. Sánchez, J.M., Ruiz, F.F., y Cautle, F.E., 1987. Comportamiento de dos tipos de tepetates bajo la adición de abonos orgánicos y abonos verdes en condiciones de invernadero, *in* Ruiz-Figueroa, J.F., Ed., *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 58-68.
125. Sánchez, J.M., 1991. Comportamiento de dos tipos de tepetates bajo la adición de abonos orgánicos y abonos verdes en condiciones de invernadero. Tesis. UACH, Chapingo. México. 119 p.
126. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicas (SARH), 1977. *Manual de conservación del suelo y del agua*. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. 584 p.
127. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicas (SARH), 1987. *La erosión y conservación del suelo en México-Realidades y Perspectivas*. Subsecretaría de Agricultura. Dirección General de Normatividad Agrícola. 34 p.
128. Secretaría de Programación y Presupuesto (S.P.P.), 1981. *Atlas Nacional del medio físico, escala 1:1'000,000*. México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Dirección de Estudios del Territorio Nacional, 224 p.

129. Secretaría de Programación y Presupuesto, 1981. Síntesis geográfica del Estado de Morelos. Instituto Nacional de Geografía e Informática. México. 110 p.
130. Secretaría de Gobernación y Gobierno del Estado de Morelos, 1988. Los Municipios de Morelos. Colección enciclopédica de los municipios de México.
131. Soil Survey Staff, 1960. Soil Classification. A comprehensive System, 7th Aproximation. U.S. Govt. Print Office, Washington, D.C. Soil Survey Staff, Supplement to Soil Classification System. Soil Conservation Service, U.S.D.A.
132. Soil Survey Staff, 1967. Soil Classification. A comprehensive System, 7th Aproximation. U.S. Govt. Print Office, Washington, D.C. Soil Survey Staff, Supplement to Soil Classification System. Soil Conservation Service, U.S.D.A.
133. Soil Survey Staff, 1984. Procedures for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey: Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture, Soil Survey Investigations Report 1, U.S. Government Printing Office, p. 80-150.
134. Steinhardt, G.C., Franzmeier, D.P., y Norton, L.D., 1982. Silica associated with fragipan and non-fragipan horizons: Soil Science Society of America Journal, Vol. 46, p. 656-657.
135. Stout, W.L., and Ciolkosz, E.J., 1973. Vama Stabilization of broken fragipan material. Soil Sci. Vol. 118, No.6: 405-411.
136. Tovar, T.A., 1987. Determinación del efecto de aplicación de estiércol de bovino semiseco y fresco sobre el rendimiento de cebada en suelos erosionados, *in* Ruíz-Figueroa, J.F., Ed., Uso y Manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH, México. p. 157-170.
137. Trueba, C.A., 1979. Reincorporación de terrenos degradados a la producción. SARH. Dir. Gral. De Conservación del Suelo y Agua. México, D.F.
138. Trueba, C.A., 1980. Tepetate and soil erosion in the Valley of México. A paper to be submitted to the Journal of Soil and Water Conservation. p. 10.
139. USDA., 1968. Soil Taxonomy: Washington, D.C., U.S., Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Handbook 436, U.S. Government Printing Office. 754 p.

- 140.USDA., 1988. Soil Taxonomy: Washington, D.C., U.S., Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Handbook 436, U.S. Government Printing Office. 754 p.
- 141.USDA., 1990. Soil Taxonomy: Washington, D.C., U.S., Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Handbook 436, U.S. Government Printing Office. 422 p.
- 142.USDA., 1994. Soil Taxonomy: Washington, D.C., U.S., Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Handbook 436, U.S. Government Printing Office. 650 p.
- 143.Valdez, M.L.A., 1970. Características morfológicas y mineralógicas de los suelos de tepetate de la cuenca de México. Tesis de Maestría . Colegio de Postgraduados. Montecillo. México. 190 p.
- 144.Vallejo, G.E., y Aguilera, H.N., 1969. "Génesis de suelos del volcán Popocatepetl" IV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Monterrey, Nuevo León.Memorias. p 92-106.
- 145.Van Zuidam, R.A., 1979. Terrain analysis and clasificattion using aerial photographs-a geomorphological appreach: Enschede, Holanda, International Training Centre. 186 p.
- 146.Velázquez, R.A.S., 1994. Efecto de diferentes cultivos sobre la disgregación y alteración de tepetates del Estado de Morelos en condiciones de invernadero. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.125 p.
- 147.Velázquez, R.A.S., 1997. Disgregación, alteración y agregación de dos niveles de trituración de tepetates del Estado de Morelos por especies vegetales perennes en condiciones de invernadero. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.147 p.
- 148.Vázquez, A.V., 1986. La conservación del suelo y agua. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidraulicos(SARH) México. México, D.F. 34 p.
- 149.Villegas, S.M., Aguilera, H.N. y Flores, D. L., 1978. Método simplificado de análisis para la clasificación granulométrica de los minerales del suelo. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología, Revista, Vol. 2. Núm. 2 p. 188-193.

150. Walkley, A.L., and Black, A., 1947. Rapid determination of soils organic matter. *Jour. Agric. Sci.* 25:598-63-68.
151. Williams, B. J., 1972. Tepetate in Valley of México. *Annals of the assn. of An. Geog.* 62(3):618-623.
152. Williams, B. J., 1992. "Tepetate" in 16th century and contemporary folk terminology, Valley of México. *Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial.* p. 486-493.
153. Williams, L.A., Parks, G.A., and Crerar, D.A., 1985. Silica diagenesis I. Solubility controls. *Journal of Sedimentary Petrology* 55(3):301-311.
154. Winter, E., 1938. Ferromanganiferous concretions from some podzolic soils. *Soil Sci.* 46: 33-40.
155. Woolnough, W.G., 1927. The duricrust of Australia. *Royal Soc. New South Wales J. and Proc.* 61:24-53.
156. Yassoglou, N.J., and Whiteside, E.P., 1960. Morphology and Genesis of some soils containing fragipans in Northern Michigan. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* Vol. 24: 396-407.
157. Zebrowski, C., 1992. Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. *Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. Terra Vol. 10 número especial.* p. 15-23.



**12. ANEXOS.**

- ➔ Calculo de velocidad de infiltración del perfil III-1.
- ➔ Calculos de las constante "a" y "b" en acumulación y velocidad de infiltración del perfil III-1.
- ➔ Calculo de velocidad de infiltración del perfil III-2.
- ➔ Calculos de las constante "a" y "b" en acumulación y velocidad de infiltración del perfil III-2.
- ➔ Calculo de velocidad de infiltración del perfil III-3.
- ➔ Calculos de las constante "a" y "b" en acumulación y velocidad de infiltración del perfil III-3.
- ➔ Calculo de velocidad de infiltración del perfil III-4.
- ➔ Calculos de las constante "a" y "b" en acumulación y velocidad de infiltración del perfil III-4.
- ➔ Gráfica de difracción de rayos X del perfil III-3
- ➔ Gráfica de difracción de rayos X del perfil III-4
- ➔ Material fotográfico de la zona del perfil III-1.
- ➔ Material fotográfico de la zona del perfil III-2.
- ➔ Material fotográfico del área del perfil III-1 y 2.

- ➡ Material fotografico del perfil III-3.
- ➡ Material fotográfico del área del perfil III-3.
- ➡ Material fotográfico del perfil III-4.
- ➡ Material fotográfico del área del perfil III-4.
- ➡ Material fotográfico del área del perfil III-4.
- ➡ Gráficas de propiedades químicas. Cationes intercambiables del perfil III-1.
- ➡ Gráficas de propiedades químicas. Cationes intercambiables del perfil III-2.
- ➡ Gráficas de propiedades químicas. Cationes intercambiables del perfil III-3.
- ➡ Gráficas de propiedades químicas. Cationes intercambiables del perfil III-4.
- ➡ Materia orgánica. Relación carbono-nitrógeno del perfil III-1.
- ➡ Materia orgánica. Relación carbono-nitrógeno del perfil III-2.
- ➡ Materia orgánica. Relación carbono-nitrógeno del perfil III-3.
- ➡ Materia orgánica. Relación carbono-nitrógeno del perfil III-4.

### CALCULO DE VELOCIDAD Y ACUMULACION DE LA INFILTRACION

#### PERFIL III-1 PAN

| TIEM<br>MIN. | INFILTRAC.<br>ACUMUL. | VELOC.<br>CM/HRS. | INFILTRAC.<br>M/MIN | TIEMPO X<br>XY | INFILTRAC.<br>$\Sigma X^2$ | ACUMUL<br>$\Sigma Y^2$ | TIEMP. X VEL. INFILT.<br>XY | Y <sup>2</sup> |
|--------------|-----------------------|-------------------|---------------------|----------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1            | 0.10                  | 6.00              | 0.10                | 0.10           | 1.00                       | 0.01                   | 6.00                        | 36.00          |
| 2            | 0.20                  | 6.00              | 0.10                | 0.40           | 4.00                       | 0.04                   | 12.00                       | 36.00          |
| 3            | 0.20                  | 0.00              | 0.00                | 0.60           | 9.00                       | 0.04                   | 0.00                        | 0.00           |
| 4            | 0.30                  | 6.00              | 0.10                | 1.20           | 16.00                      | 0.09                   | 24.00                       | 36.00          |
| 5            | 0.35                  | 3.00              | 0.05                | 1.75           | 25.00                      | 0.12                   | 15.00                       | 9.00           |
| 10           | 0.55                  | 2.40              | 0.04                | 5.50           | 100.00                     | 0.30                   | 24.00                       | 5.76           |
| 20           | 0.60                  | 0.60              | 0.01                | 12.00          | 400.00                     | 0.36                   | 12.00                       | 0.36           |
| 30           | 0.85                  | 1.50              | 0.03                | 25.50          | 900.00                     | 0.72                   | 45.00                       | 2.25           |
| 45           | 1.15                  | 1.20              | 0.02                | 51.75          | 2025.00                    | 1.32                   | 54.00                       | 1.44           |
| 60           | 1.30                  | 0.60              | 0.01                | 78.00          | 3600.00                    | 1.69                   | 36.00                       | 0.36           |
| 90           | 1.90                  | 1.20              | 0.02                | 171.00         | 8100.00                    | 3.61                   | 108.00                      | 1.44           |
| 120          | 2.10                  | 0.40              | 0.01                | 252.00         | 14400.00                   | 4.41                   | 48.00                       | 0.16           |
| <b>SUMA</b>  |                       |                   |                     | <b>599.80</b>  | <b>29580.00</b>            | <b>12.72</b>           | <b>384.00</b>               | <b>128.77</b>  |

#### PERFIL III-1 SUELO

| TIEM<br>MIN. | INFILTRAC.<br>ACUMUL. | VELOC.<br>CM/HRS. | INFILTRAC.<br>M/MIN | TIEMPO X<br>XY | INFILTRAC.<br>$\Sigma X^2$ | ACUMUL<br>$\Sigma Y^2$ | TIEMP. X VEL. INFILT.<br>XY | Y <sup>2</sup> |
|--------------|-----------------------|-------------------|---------------------|----------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1            | 0.41                  | 24.00             | 0.40                | 0.41           | 1.00                       | 0.17                   | 24.00                       | 576.00         |
| 2            | 0.60                  | 12.00             | 0.20                | 1.20           | 4.00                       | 0.36                   | 24.00                       | 144.00         |
| 3            | 0.70                  | 6.00              | 0.10                | 2.10           | 9.00                       | 0.49                   | 18.00                       | 36.00          |
| 4            | 0.70                  | 0.00              | 0.00                | 2.80           | 16.00                      | 0.49                   | 0.00                        | 0.00           |
| 5            | 0.80                  | 6.00              | 0.10                | 4.00           | 25.00                      | 0.64                   | 30.00                       | 36.00          |
| 10           | 1.40                  | 7.20              | 0.10                | 14.00          | 100.00                     | 1.96                   | 72.00                       | 51.84          |
| 20           | 1.70                  | 0.30              | 0.01                | 34.00          | 400.00                     | 2.89                   | 6.00                        | 0.09           |
| 30           | 2.20                  | 0.50              | 0.01                | 66.00          | 900.00                     | 4.84                   | 15.00                       | 0.25           |
| 45           | 2.80                  | 2.40              | 0.40                | 126.00         | 2025.00                    | 7.84                   | 108.00                      | 5.76           |
| 60           | 3.70                  | 3.60              | 0.06                | 222.00         | 3600.00                    | 13.69                  | 216.00                      | 12.96          |
| 90           | 6.20                  | 5.00              | 0.08                | 558.00         | 8100.00                    | 38.44                  | 450.00                      | 25.00          |
| 120          | 6.40                  | 0.40              | 0.01                | 768.00         | 14400.00                   | 40.96                  | 48.00                       | 0.16           |
| <b>SUMA</b>  |                       |                   |                     | <b>1798.51</b> | <b>29580.00</b>            | <b>112.77</b>          | <b>1011.00</b>              | <b>888.06</b>  |

CALCULO DE LAS CONSTANTES "a" Y "b" EN ACUMULACION Y VELOCIDAD DE LA INFILTRACION

PERFIL III-1

FORMULA DE LA DESVIACION DE LA MEDIA

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$


---

PAN

INFILTRACION ACUMULADA

VELOCIDAD DE INFILTRACION

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum 1798.5)^2 / \sum 29580^2 * \sum 112.77^2$$

$$r^2 = (\sum 1011)^2 / \sum 29580^2 * \sum 888.06^2$$

$$r^2 = 3234602.25 / 3335736.6 = 0.9697$$

$$r^2 = 1022121 / 26268814.8 = 0.0389$$

$$a = 0.41$$

$$b = 0.9697$$

$$a = 24$$

$$b = 0.0389$$


---

SUELO

INFILTRACION ACUMULADA

VELOCIDAD DE INFILTRACION

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum 599.80)^2 / \sum 29580^2 * \sum 12.72^2$$

$$r^2 = (\sum 384)^2 / \sum 29580^2 * \sum 128.77^2$$

$$r^2 = 359790.04 / 376257.6 = 0.9562$$

$$r^2 = 147456 / 3809016.6 = 0.0387$$

$$a = 0.10$$

$$b = 0.9562$$


---

$$a = 6.00$$

$$b = 0.0387$$

## CALCULO DE VELOCIDAD Y ACUMULACION DE LA INFILTRACION

## PERFIL III-2 PAN

| TIEM<br>MIN. | INFILTRAC.<br>ACUMUL. | VELOC. INFILTRAC<br>CM/HRS. | CM/MIN. | TIEMPO X<br>XY | INFILTRAC. ACUMUL.<br>$\Sigma X^2$ | TIEMP. X VEL. INFILT.<br>$\Sigma Y^2$ | XY     | $Y^2$   |
|--------------|-----------------------|-----------------------------|---------|----------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------|---------|
| 1            | 0.40                  | 24.00                       | 0.40    | 0.40           | 1.00                               | 0.16                                  | 24.00  | 576.00  |
| 2            | 0.70                  | 18.00                       | 0.30    | 1.40           | 4.00                               | 0.49                                  | 36.00  | 324.00  |
| 3            | 0.90                  | 18.00                       | 0.20    | 2.70           | 9.00                               | 0.81                                  | 54.00  | 324.00  |
| 4            | 1.00                  | 12.00                       | 0.10    | 4.00           | 16.00                              | 1.00                                  | 48.00  | 144.00  |
| 5            | 1.00                  | 6.00                        | 0.00    | 5.00           | 25.00                              | 1.00                                  | 30.00  | 36.00   |
| 10           | 1.15                  | 0.60                        | 0.03    | 11.50          | 100.00                             | 1.32                                  | 6.00   | 0.36    |
| 20           | 1.35                  | 1.80                        | 0.03    | 27.00          | 400.00                             | 1.82                                  | 36.00  | 3.24    |
| 30           | 1.40                  | 0.60                        | 0.01    | 42.00          | 900.00                             | 1.96                                  | 18.00  | 0.36    |
| 45           | 1.70                  | 0.10                        | 0.02    | 76.50          | 2025.00                            | 2.89                                  | 4.50   | 0.01    |
| 60           | 1.75                  | 0.00                        | 0.00    | 105.00         | 3600.00                            | 3.06                                  | 0.00   | 0.00    |
| 90           | 2.20                  | 0.10                        | 0.02    | 198.00         | 8100.00                            | 4.84                                  | 9.00   | 0.01    |
| 120          | 2.25                  | 0.00                        | 0.00    | 270.00         | 14400.00                           | 5.06                                  | 0.00   | 0.00    |
| SUMA         |                       |                             |         | 743.5          | 29580                              | 24.42                                 | 265.50 | 1407.98 |

## PERFIL III-2 SUELO

| TIEM<br>MIN. | INFILTRAC.<br>ACUMUL. | VELOC. INFILTRAC<br>CM/HRS. | CM/MIN. | TIEMPO X<br>XY | INFILTRAC. ACUMUL.<br>$\Sigma X^2$ | TIEMP. X VEL. INFILT.<br>$\Sigma Y^2$ | XY      | $Y^2$   |
|--------------|-----------------------|-----------------------------|---------|----------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------|---------|
| 1            | 0.50                  | 30.00                       | 0.50    | 0.50           | 1.00                               | 0.25                                  | 30.00   | 900.00  |
| 2            | 0.90                  | 30.00                       | 0.40    | 1.80           | 4.00                               | 0.81                                  | 60.00   | 900.00  |
| 3            | 1.60                  | 36.00                       | 1.00    | 4.80           | 9.00                               | 2.56                                  | 108.00  | 1296.00 |
| 4            | 2.00                  | 30.00                       | 0.40    | 8.00           | 16.00                              | 4.00                                  | 120.00  | 900.00  |
| 5            | 2.60                  | 30.00                       | 0.60    | 13.00          | 25.00                              | 6.76                                  | 150.00  | 900.00  |
| 10           | 5.90                  | 40.80                       | 0.66    | 59.00          | 100.00                             | 34.81                                 | 408.00  | 1664.64 |
| 20           | 10.30                 | 25.80                       | 0.44    | 206.00         | 400.00                             | 106.09                                | 516.00  | 665.64  |
| 30           | 11.90                 | 10.20                       | 0.16    | 357.00         | 900.00                             | 141.61                                | 306.00  | 104.04  |
| 45           | 16.40                 | 17.60                       | 0.30    | 738.00         | 2025.00                            | 268.96                                | 792.00  | 309.76  |
| 60           | 18.00                 | 6.80                        | 0.11    | 1080.00        | 3600.00                            | 324.00                                | 408.00  | 46.24   |
| 90           | 25.70                 | 15.20                       | 0.26    | 2313.00        | 8100.00                            | 660.49                                | 1368.00 | 231.04  |
| 120          | 28.00                 | 5.80                        | 0.01    | 3360.00        | 14400.00                           | 784.00                                | 696.00  | 33.64   |
| SUMA         |                       |                             |         | 8141.1         | 29580                              | 2334.34                               | 4962.00 | 7951.00 |

CALCULO DE LAS CONSTANTES "a" Y "b" EN ACUMULACION Y VELOCIDAD  
DE LA INFILTRACION

PERFIL III-2

FORMULA DE LA DESVIACION DE LA MEDIA

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$


---

PAN

INFILTRACION ACUMULADA

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum 743.55)^2 / \sum 29580^2 * \sum 24.42^2$$

$$r^2 = 552866.60 / 722343.6 = 0.7654$$

a=0.40  
b=0.7654

VELOCIDAD DE INFILTRACION

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum 265.5)^2 / \sum 29580^2 * \sum 1407.98^2$$

$$r^2 = 70490.25 / 416170728 = 0.000169$$

a=24.00  
b=0.00017

---

SUELO

INFILTRACION ACUMULADA

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum 8141.1)^2 / \sum 29580^2 * \sum 2334.34^2$$

$$r^2 = 66277509.2 / 69049777.2 = 0.9599$$

a=0.50  
b=0.9599

VELOCIDAD DE INFILTRACION

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum 4962)^2 / \sum 29580^2 * \sum 7951^2$$

$$r^2 = 24621444 / 235190580 = 0.1047$$

a=30.00  
b=0.1047

---

## CALCULO DE VELOCIDAD Y ACUMULACION DE LA INFILTRACION

### PERFIL III-3 PAN

| TIEM<br>MIN | INFILTRAC.<br>ACUMUL | VELOC. INFILTRAC.<br>CM/HRS. CM/MIN. | TIEMPO X INFILTRAC. ACUMUL.<br>XY | $\Sigma X^2$    | $\Sigma Y^2$  | TIEMP. X VEL. INFILT.<br>XY | $Y^2$          |
|-------------|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------|---------------|-----------------------------|----------------|
| 1           | 0.30                 | 18.00                                | 0.30                              | 1.00            | 0.09          | 18.00                       | 324.00         |
| 2           | 0.30                 | 0.00                                 | 0.60                              | 4.00            | 0.09          | 0.00                        | 0.00           |
| 3           | 0.70                 | 24.00                                | 2.10                              | 9.00            | 0.49          | 72.00                       | 576.00         |
| 4           | 0.70                 | 0.00                                 | 2.80                              | 16.00           | 0.49          | 0.00                        | 0.00           |
| 5           | 0.80                 | 6.00                                 | 4.00                              | 25.00           | 0.64          | 30.00                       | 36.00          |
| 10          | 1.30                 | 6.00                                 | 13.00                             | 100.00          | 1.69          | 60.00                       | 36.00          |
| 20          | 1.40                 | 0.60                                 | 28.00                             | 400.00          | 1.96          | 12.00                       | 0.36           |
| 30          | 1.60                 | 1.20                                 | 48.00                             | 900.00          | 2.56          | 36.00                       | 1.44           |
| 45          | 2.10                 | 2.00                                 | 84.00                             | 2025.00         | 4.41          | 90.00                       | 4.00           |
| 60          | 2.60                 | 2.00                                 | 156.00                            | 3600.00         | 6.76          | 120.00                      | 4.00           |
| 90          | 5.20                 | 5.20                                 | 468.00                            | 8100.00         | 27.04         | 468.00                      | 27.04          |
| 120         | 7.80                 | 5.20                                 | 936.00                            | 14400.00        | 60.84         | 624.00                      | 27.04          |
| <b>SUMA</b> |                      |                                      | <b>1753.30</b>                    | <b>29580.00</b> | <b>107.06</b> | <b>1530.00</b>              | <b>1035.88</b> |

### PERFIL III-3 SUELO

| TIEM<br>MIN. | INFILTRAC.<br>ACUMUL. | VELOC. INFILTRA<br>CM/HRS. CM/MIN | TIEMPO X INFITRAC. ACUMUL.<br>XY | $\Sigma X^2$    | $\Sigma Y^2$  | TIEMP. X VEL. INFILT.<br>XY | $Y^2$          |
|--------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------|---------------|-----------------------------|----------------|
| 1            | 1.00                  | 60.00                             | 1.00                             | 1.00            | 1.00          | 60.00                       | 3600.00        |
| 2            | 1.80                  | 48.00                             | 3.60                             | 4.00            | 3.24          | 96.00                       | 2304.00        |
| 3            | 2.00                  | 12.00                             | 6.00                             | 9.00            | 4.00          | 36.00                       | 144.00         |
| 4            | 2.30                  | 18.00                             | 9.20                             | 16.00           | 5.29          | 72.00                       | 324.00         |
| 5            | 2.40                  | 6.00                              | 12.00                            | 25.00           | 5.76          | 30.00                       | 36.00          |
| 10           | 3.50                  | 13.20                             | 35.00                            | 100.00          | 12.25         | 132.00                      | 174.24         |
| 20           | 4.70                  | 7.20                              | 94.00                            | 400.00          | 22.09         | 144.00                      | 51.84          |
| 30           | 6.10                  | 8.40                              | 183.00                           | 900.00          | 37.21         | 252.00                      | 70.56          |
| 45           | 7.00                  | 3.60                              | 315.00                           | 2025.00         | 49.00         | 162.00                      | 12.96          |
| 60           | 8.30                  | 5.20                              | 498.00                           | 3600.00         | 68.89         | 312.00                      | 27.04          |
| 90           | 10.00                 | 3.40                              | 900.00                           | 8100.00         | 100.00        | 306.00                      | 11.56          |
| 120          | 15.20                 | 10.40                             | 1824.00                          | 14400.00        | 231.04        | 1248.00                     | 108.16         |
| <b>SUMA</b>  |                       |                                   | <b>3880.80</b>                   | <b>29580.00</b> | <b>539.77</b> | <b>2850.00</b>              | <b>6864.36</b> |

CALCULO DE LAS CONSTANTES "a" Y "b" EN ACUMULACION Y VELOCIDAD  
DE LA INFILTRACION

PERFIL III-3

FORMULA DE LA DESVIACION DE LA MEDIA

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$


---

PAN

INFILTRACION ACUMULADA

VELOCIDAD DE INFILTRACION

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum 1753.30)^2 / \sum 29580^2 * \sum 107.06^2$$

$$r^2 = (\sum 1530)^2 / \sum 29580^2 * \sum 1035.88^2$$

$$r^2 = 3074060.89 / 3166834.8 = 0.9707$$

$$r^2 = 2340900 / 30641330.4 = 0.0764$$

a=0.30  
b=0.9707

a=18.00  
b=0.0764

---

SUELO

INFILTRACION ACUMULADA

VELOCIDAD DE INFILTRACION

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum 3880.80)^2 / \sum 29580^2 * \sum 539.77^2$$

$$r^2 = (\sum 2850)^2 / \sum 29580^2 * \sum 6864.36^2$$

$$r^2 = 15060608.6 / 15966396.6 = 0.9433$$

$$r^2 = 8122500 / 203047769 = 0.0400$$

a=1.00  
b=0.9433

---

a=60.00  
b=0.0400



### CALCULO DE VELOCIDAD Y ACUMULACION DE LA INFILTRACION

#### PERFIL III-4 PAN

| TIEM<br>MIN | INFILTRAC.<br>ACUMUL | ELOC. INFILTRAC.<br>CM/HRS. | INFILTRAC.<br>CM/MIN. | TIEMPO X<br>XY | INFILTRAC. ACUMUL.<br>$\Sigma X^2$ | TIEMP. X VEL. INFILT.<br>$\Sigma Y^2$ | XY             | $Y^2$          |
|-------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|------------------------------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| 1           | 0.20                 | 17.00                       | 0.28                  | 0.20           | 1.00                               | 0.04                                  | 17.00          | 289.00         |
| 2           | 0.20                 | 0.00                        | 0.00                  | 0.40           | 4.00                               | 0.04                                  | 0.00           | 0.00           |
| 3           | 0.60                 | 25.00                       | 0.42                  | 1.80           | 9.00                               | 0.36                                  | 75.00          | 625.00         |
| 4           | 0.60                 | 0.00                        | 0.00                  | 2.40           | 16.00                              | 0.36                                  | 0.00           | 0.00           |
| 5           | 0.90                 | 7.00                        | 0.12                  | 4.50           | 25.00                              | 0.81                                  | 35.00          | 49.00          |
| 10          | 1.20                 | 7.00                        | 0.12                  | 12.00          | 100.00                             | 1.44                                  | 70.00          | 49.00          |
| 20          | 1.30                 | 0.40                        | 0.01                  | 26.00          | 400.00                             | 1.69                                  | 8.00           | 0.16           |
| 30          | 1.70                 | 1.10                        | 0.02                  | 51.00          | 900.00                             | 2.89                                  | 33.00          | 1.21           |
| 45          | 2.30                 | 3.00                        | 0.05                  | 103.50         | 2025.00                            | 5.29                                  | 135.00         | 9.00           |
| 60          | 2.70                 | 2.00                        | 0.03                  | 162.00         | 3600.00                            | 7.29                                  | 120.00         | 4.00           |
| 90          | 5.00                 | 5.00                        | 0.08                  | 450.00         | 8100.00                            | 25.00                                 | 450.00         | 25.00          |
| 120         | 7.90                 | 6.00                        | 0.10                  | 948.00         | 14400.00                           | 62.41                                 | 720.00         | 36.00          |
| <b>SUMA</b> |                      |                             |                       | <b>1761.80</b> | <b>29580.00</b>                    | <b>107.62</b>                         | <b>1663.00</b> | <b>1087.37</b> |

#### PERFIL III-4 SUELO

| TIEM<br>MIN. | INFILTRAC.<br>ACUMUL. | ELOC. INFILTRAC.<br>CM/HRS. | INFILTRAC.<br>CM/MIN. | TIEMPO X<br>XY | INFILTRAC. ACUMUL.<br>$\Sigma X^2$ | TIEMP. X VEL. INFILT.<br>$\Sigma Y^2$ | XY             | $Y^2$          |
|--------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|------------------------------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| 1            | 1.00                  | 61.00                       | 1.02                  | 1.00           | 1.00                               | 1.00                                  | 61.00          | 3721.00        |
| 2            | 2.00                  | 49.00                       | 0.82                  | 4.00           | 4.00                               | 4.00                                  | 98.00          | 2401.00        |
| 3            | 2.50                  | 13.00                       | 0.22                  | 7.50           | 9.00                               | 6.25                                  | 39.00          | 169.00         |
| 4            | 2.80                  | 18.00                       | 0.30                  | 11.20          | 16.00                              | 7.84                                  | 72.00          | 324.00         |
| 5            | 2.70                  | 6.00                        | 0.10                  | 13.50          | 25.00                              | 7.29                                  | 30.00          | 36.00          |
| 10           | 3.90                  | 14.00                       | 0.23                  | 39.00          | 100.00                             | 15.21                                 | 140.00         | 196.00         |
| 20           | 4.90                  | 7.00                        | 0.12                  | 98.00          | 400.00                             | 24.01                                 | 140.00         | 49.00          |
| 30           | 6.50                  | 8.00                        | 0.13                  | 195.00         | 900.00                             | 42.25                                 | 240.00         | 64.00          |
| 45           | 6.00                  | 4.00                        | 0.07                  | 270.00         | 2025.00                            | 36.00                                 | 180.00         | 16.00          |
| 60           | 8.00                  | 6.00                        | 0.10                  | 480.00         | 3600.00                            | 64.00                                 | 360.00         | 36.00          |
| 90           | 11.00                 | 4.00                        | 0.07                  | 990.00         | 8100.00                            | 121.00                                | 360.00         | 16.00          |
| 120          | 15.00                 | 11.00                       | 0.18                  | 1800.00        | 14400.00                           | 225.00                                | 1320.00        | 121.00         |
| <b>SUMA</b>  |                       |                             |                       | <b>3909.20</b> | <b>29580.00</b>                    | <b>553.85</b>                         | <b>3040.00</b> | <b>7149.00</b> |

CALCULO DE LAS CONSTANTES "a" Y "b" EN ACUMULACION Y VELOCIDAD DE LA INFILTRACION

PERFIL III-4

FORMULA DE LA DESVIACION DE LA MEDIA

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$


---

PAN

INFILTRACION ACUMULADA

VELOCIDAD DE INFILTRACION

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum 1761.80)^2 / \sum 29580^2 * \sum 107.62^2$$

$$r^2 = (\sum 1663)^2 / \sum 29580^2 * \sum 1087.37^2$$

$$r^2 = 3103939.24 / 3183399.6 = 0.9750$$

$$r^2 = 2765569 / 32164404.6 = 0.0860$$

a=0.20  
b=0.9750

a=17.00  
b=0.0860

---

SUELO

INFILTRACION ACUMULADA

VELOCIDAD DE INFILTRACION

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum XY)^2 / \sum X^2 \sum Y^2$$

$$r^2 = (\sum 3909.2)^2 / \sum 29580^2 * \sum 553.85^2$$

$$r^2 = (\sum 3040)^2 / \sum 29580^2 * \sum 7149^2$$

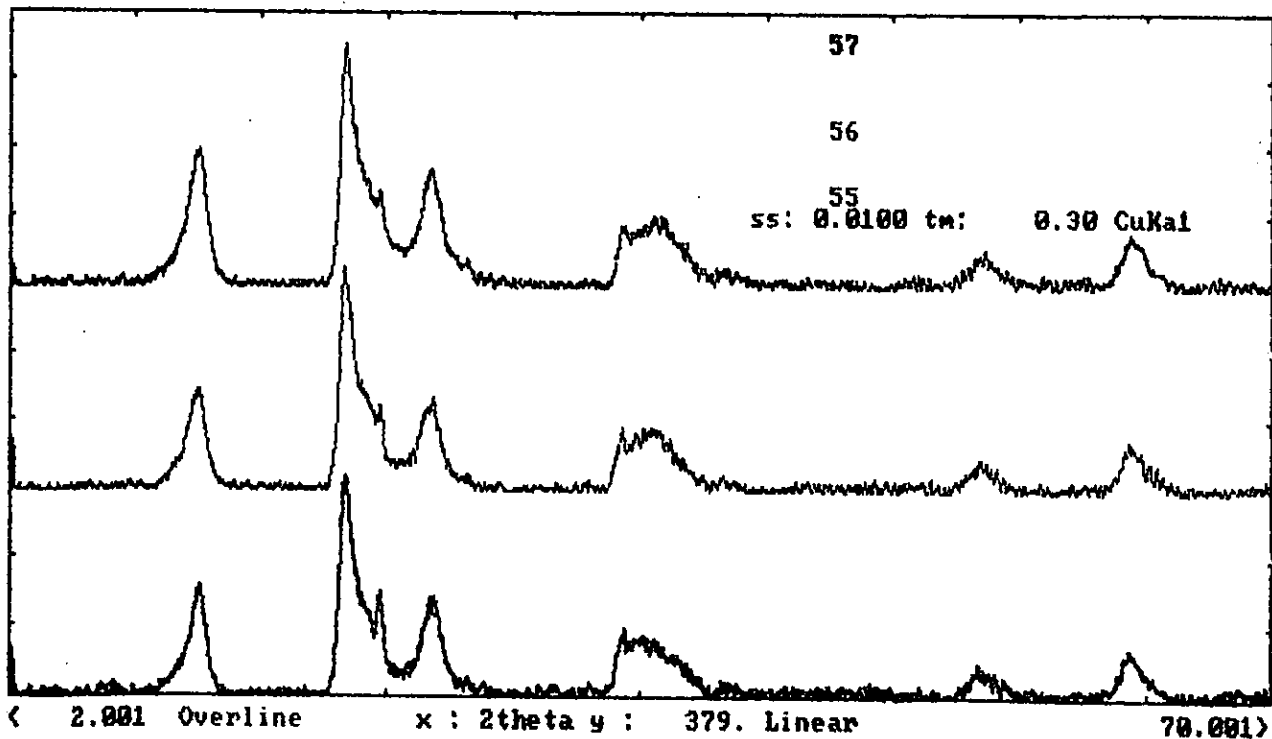
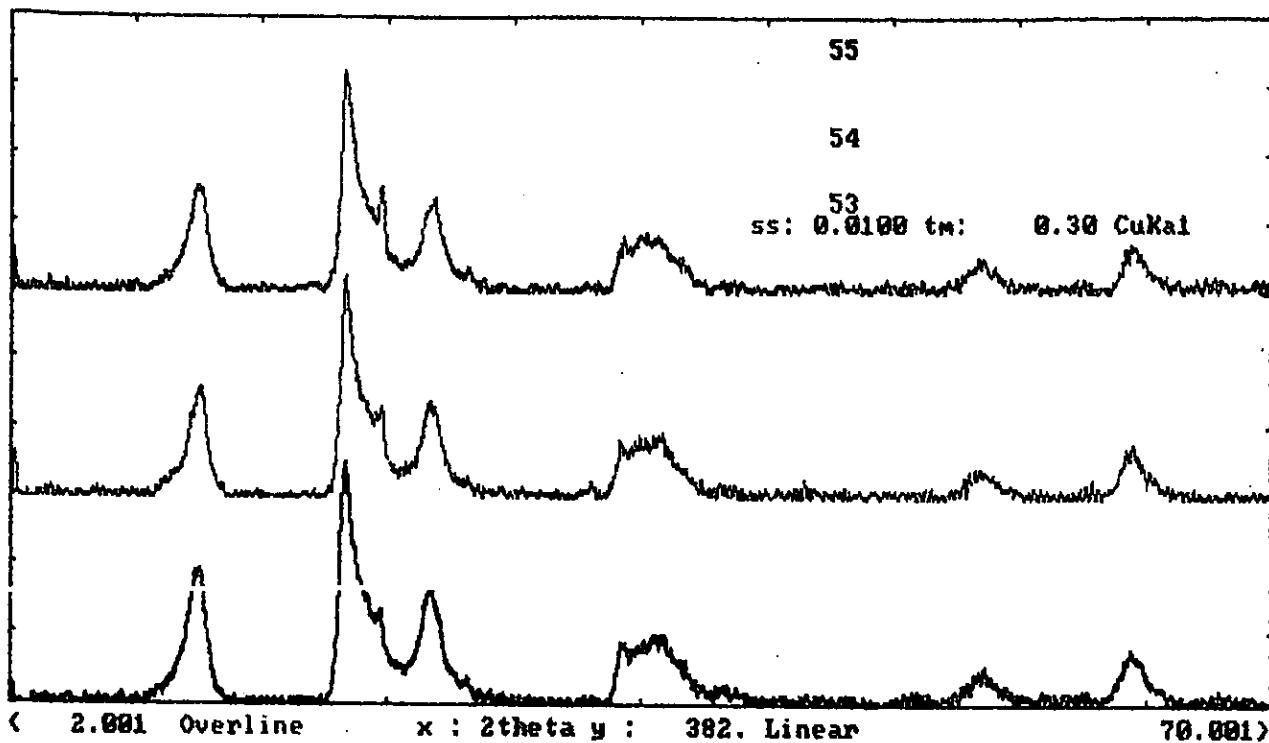
$$r^2 = 15281844.6 / 16382883 = 0.9324$$

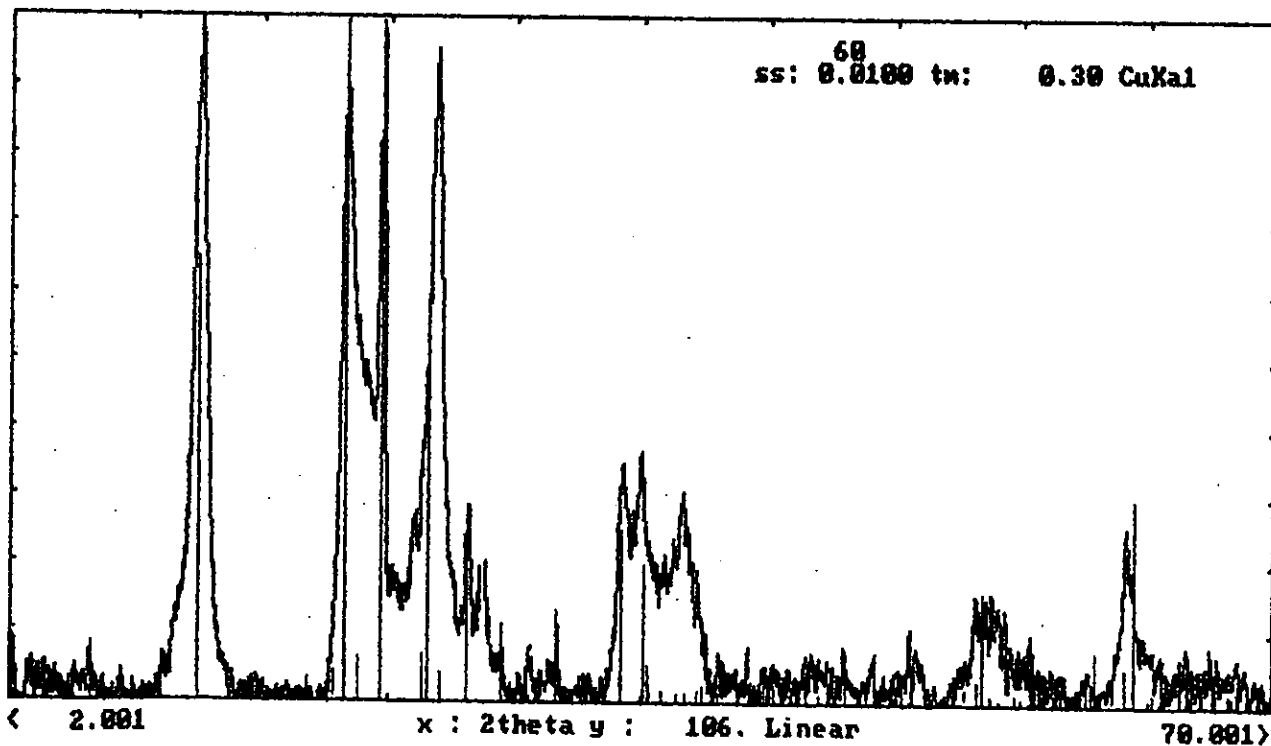
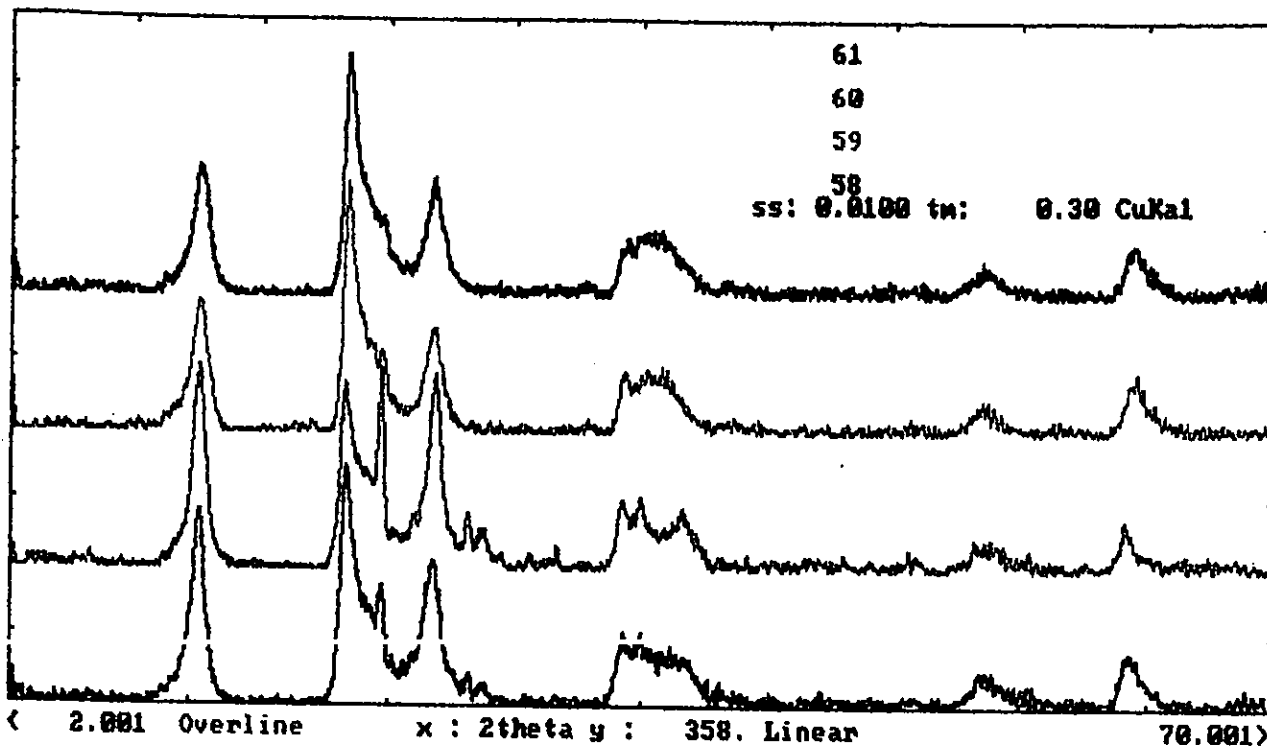
$$r^2 = 9241600 / 211467420 = 0.0437$$

9241600    211467420    0.04370224  
a=1.00  
b=0.9324

a=61.00  
b=0.0437

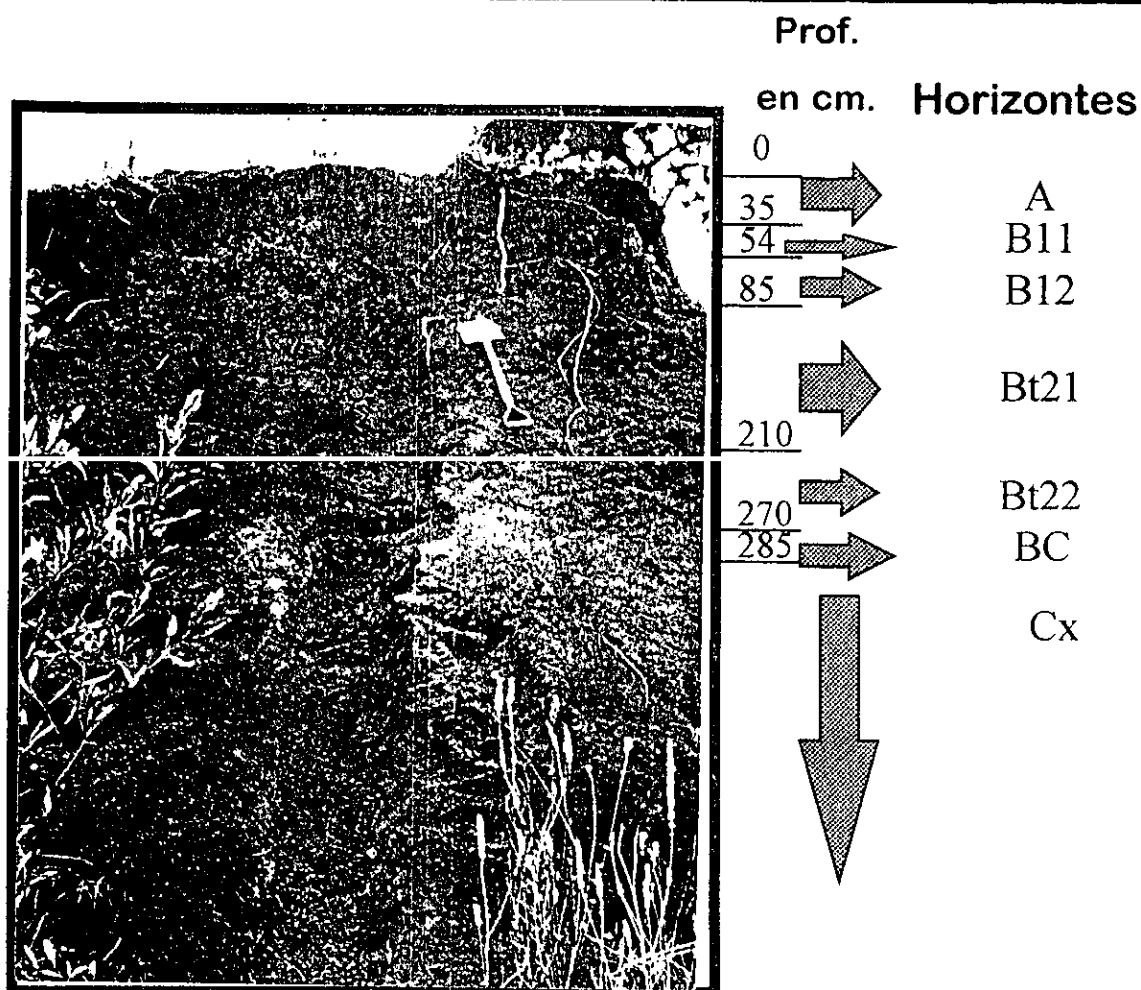
---





- 29-1487 Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> HALLOYSITE-7A
- 11-0695 I SiO<sub>2</sub> CRISTOBALITE, LOW, SYN
- 33-1161 \* SiO<sub>2</sub> QUARTZ, LOW
- 13-0086 Mg<sub>3</sub>(SiAl)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>.XH<sub>2</sub>O SAPONITE-15A

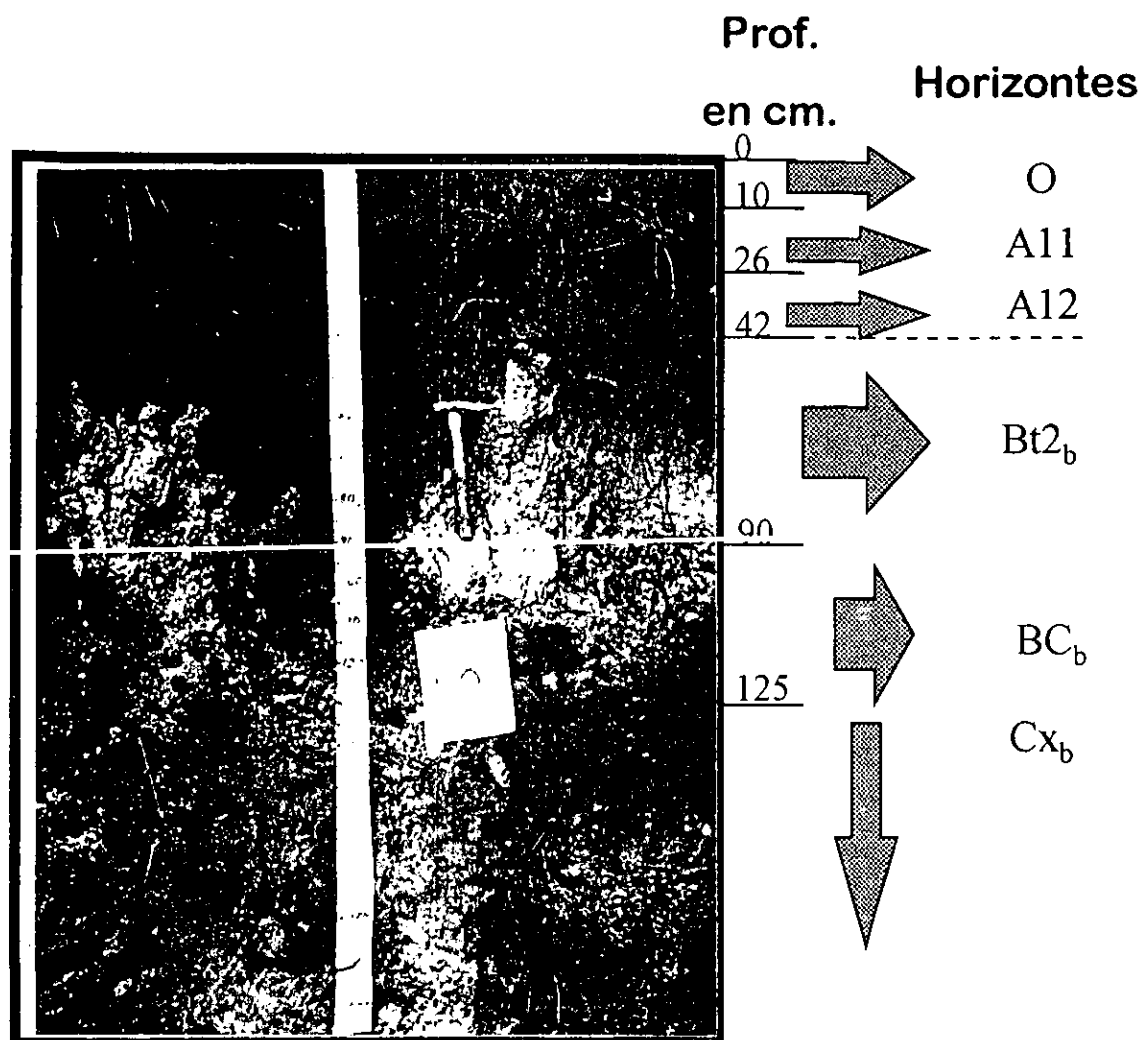
## Material fotográfico del perfil III-1



Escala Aproximada de fotografía de 1 cm = 66.67 cm.

Perfil III-1.- Se localiza en la orilla de un corte de carretera, es el perfil que registro mayor profundidad (mas de 285 cm), presento 3 horizontes principales y 5 subhorizontes. La presencia de la capa endurecida se encontró a los 285 cm., determinandose ésta como un fragipán. Dentro del horizonte B y subhorizontes(B11, B12, Bt21 Y Bt22), se presentó el mayor contenido de fracciones arcillosas, reflejandose con la presencia de películas de arcilla. Los horizontes Bt21 y Cx son los que presentaron mayor amplitud vertical a lo largo del perfil.

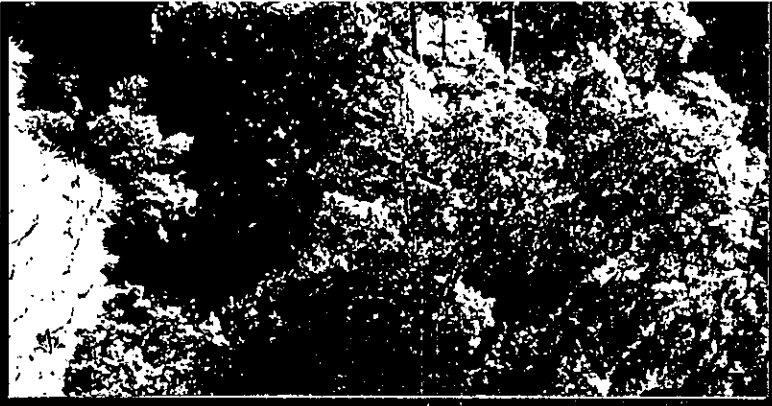
## Material fotográfico del perfil III-2



Escala aproximada de fotografía de 1 cm = 18.26 cm.

Perfil III-2.- Localizado en el punto mas alto de la área de estudio (2,250 msnm) cercano a la carretera rumbo a Chalma. Presenta cuatro horizontes principales con cuatro subhorizontes en una profundidad de 125 cm.; a mayor profundidad se presentó la capa endurecida que fue determinada como un fragipán. En el horizonte BC<sub>b</sub>, se localizó el mayor contenido de arcilla. La coloración oscura en los primeros cm. del perfil y la presencia de un horizonte O, es indicativo de la acumulación de materia orgánica, en este caso por la incorporación de material vegetativo proveniente del bosque de pino que sostiene el suelo.

## Material fotográfico del área del perfil III-1 y 2

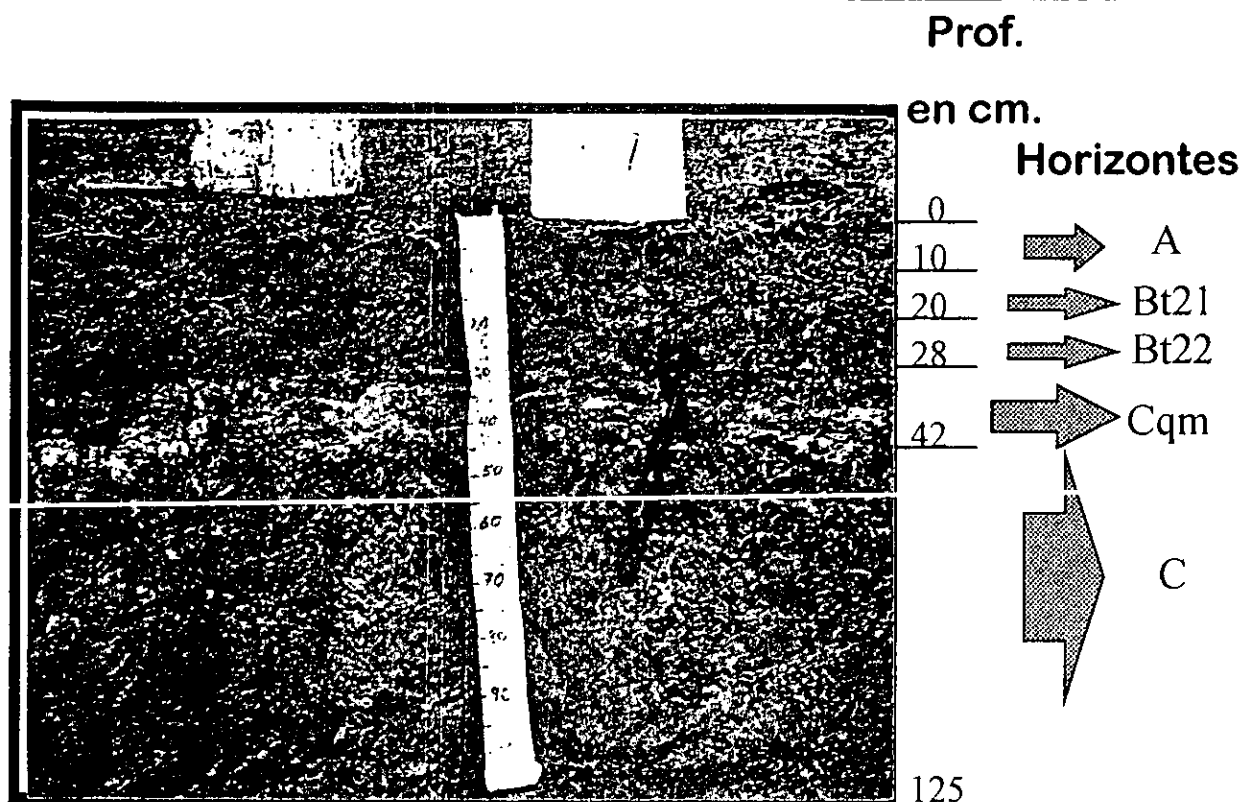


Panorámica del área de estudio próxima a los perfiles III-1 y 2, donde se pueden apreciar los bosques de Pino, así como su pendiente abrupta con ladera típicas de relieves montañosos, con interfluvios que se encuentran limitados por una red de valles en forma de V. La amplitud de relieve entre los Talweg y la cresta del interfluvio generalmente varía de 200 a 300 metros en estas altitudes.



# Material fotografico del perfil III-3

165



Escala aproximada de fotografia de 1 cm = 14.47 cm.

Perfil III-3.- Localizado cercano a unos terrenos agrícolas de temporal de tracción animal, donde generalmente se siembra maíz, próximo a la población de Ahuatenco. Está formado por tres horizontes principales y por tres subhorizontes. La presencia de la capa endurecida fue en los 28 a 42 cm de profundidad y se determinó como un duripán, aquí se encontraron los colores mas claros del perfil.

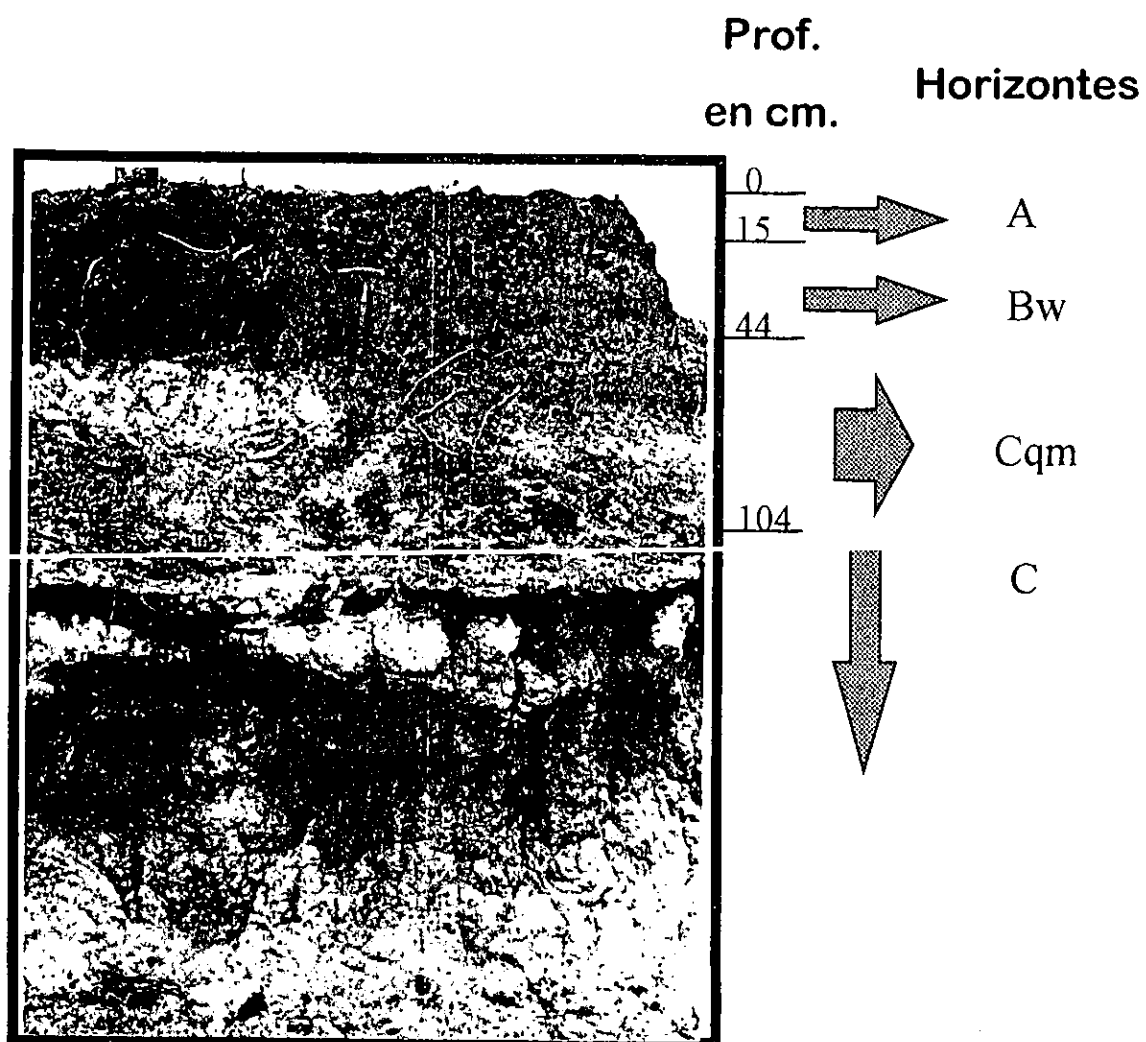


## Material fotográfico del área del perfil III-3



Area de cultivos cercanos al perfil III-3, donde usualmente los campesinos siembran maíz en forma tradicional. En la foto inferior se aprecian los mogotes que se forman para secar el material vegetativo, que posteriormente servirá para alimentar el ganado de la región.

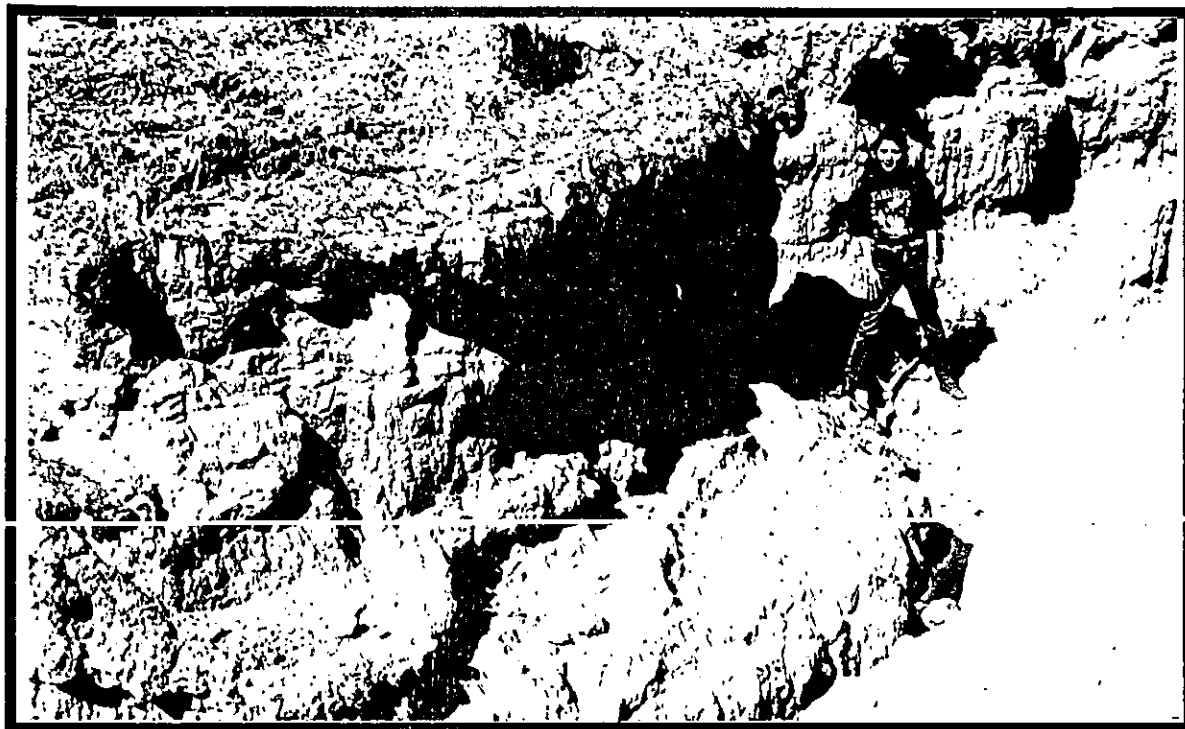




Escala aproximada de fotografía de 1 cm = 25 cm.

Perfil III-4.- Localizado en el punto mas bajo de área de estudio (1800 msnm) cercano al poblado de Buenavista del Monte rumbo al sur, presenta tres horizontes principales con dos subhorizontes en una profundidad de 104 cm., la capa endurecida se presentó a 28 cm y fue determinada como un duripán. Es la zona que presenta mayor erosión, existiendo una fuerte pérdida del suelo, manifestándose por la presencia de grandes cárcavas y casi nula existencia de vegetación.

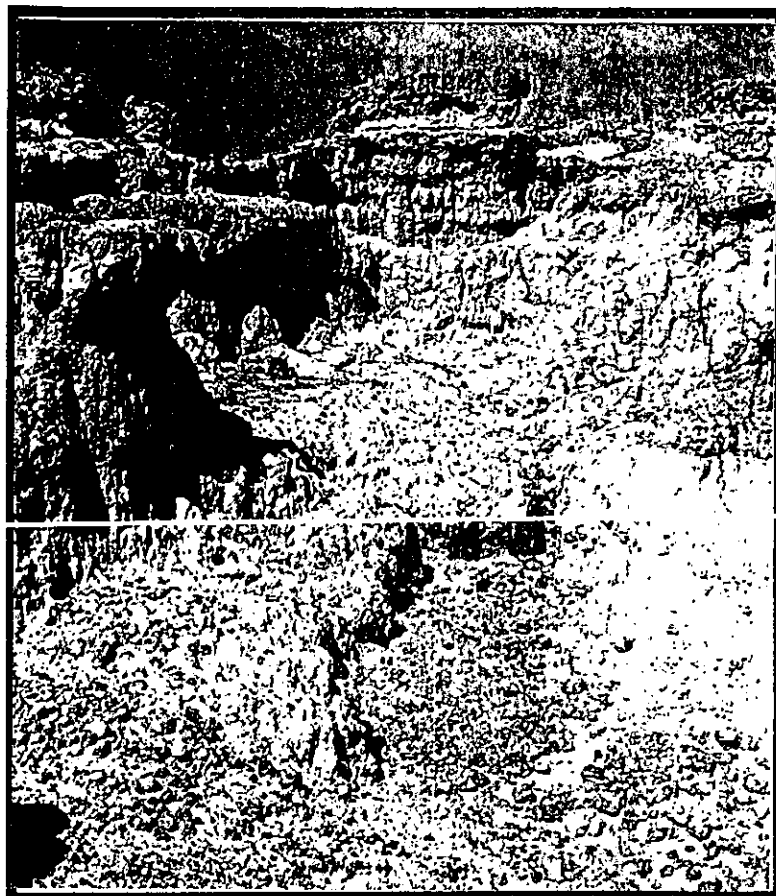
## Material fotográfico del área del perfil III-4



Area del perfil III-4, apreciación de la fuerte erosión que han sufrido estos suelos, así como la exposición de las capas endurecidas, la formación de grandes cárcavas y formas de erosión de pedestal.

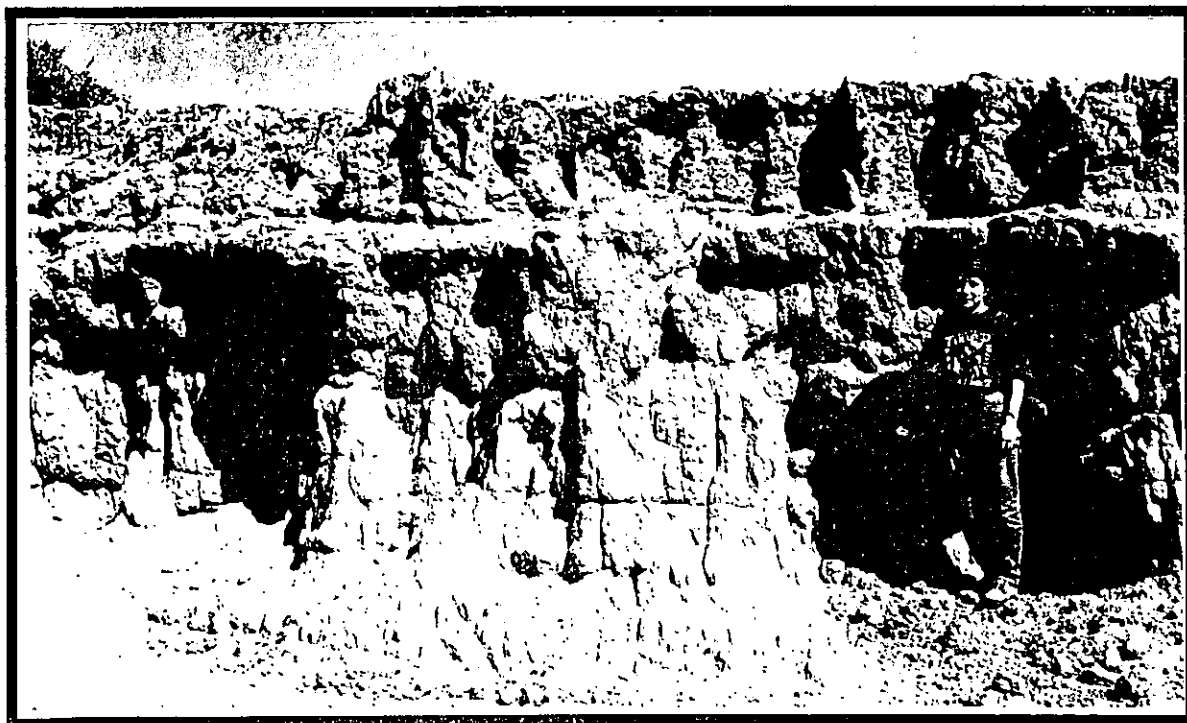


## Material fotográfico del área del perfil III-4



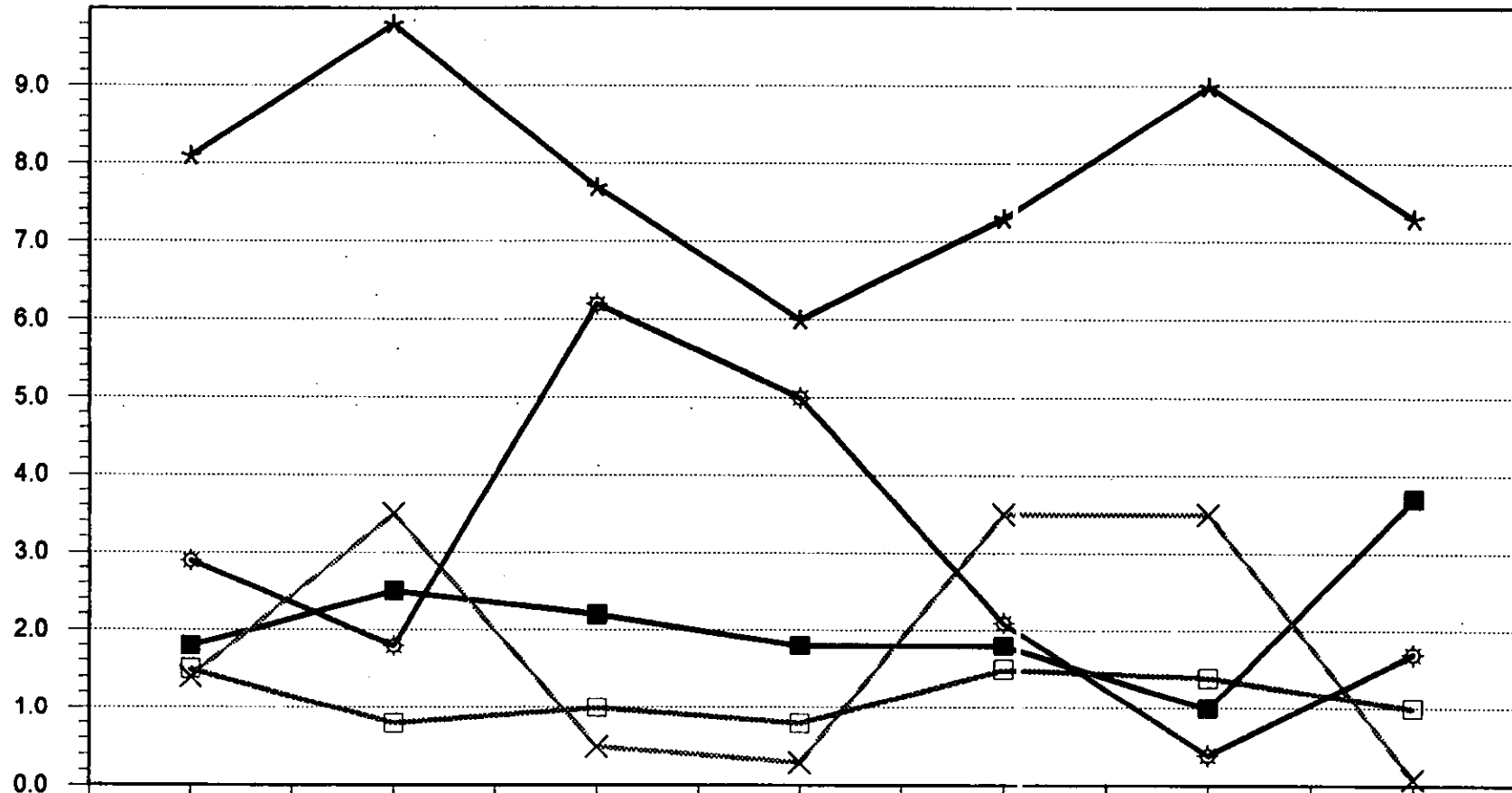
Vista del perfil III-4, donde existe la mayor pérdida de suelo, por el proceso de erosión.

La existencia de grandes cárcavas y la nula presencia de capa de suelo, son causa por el mal manejo y uso irracional de los recursos naturales.



# Propiedades Químicas Cationes Intercambiables P111-1

M.eq/100g. de suelo



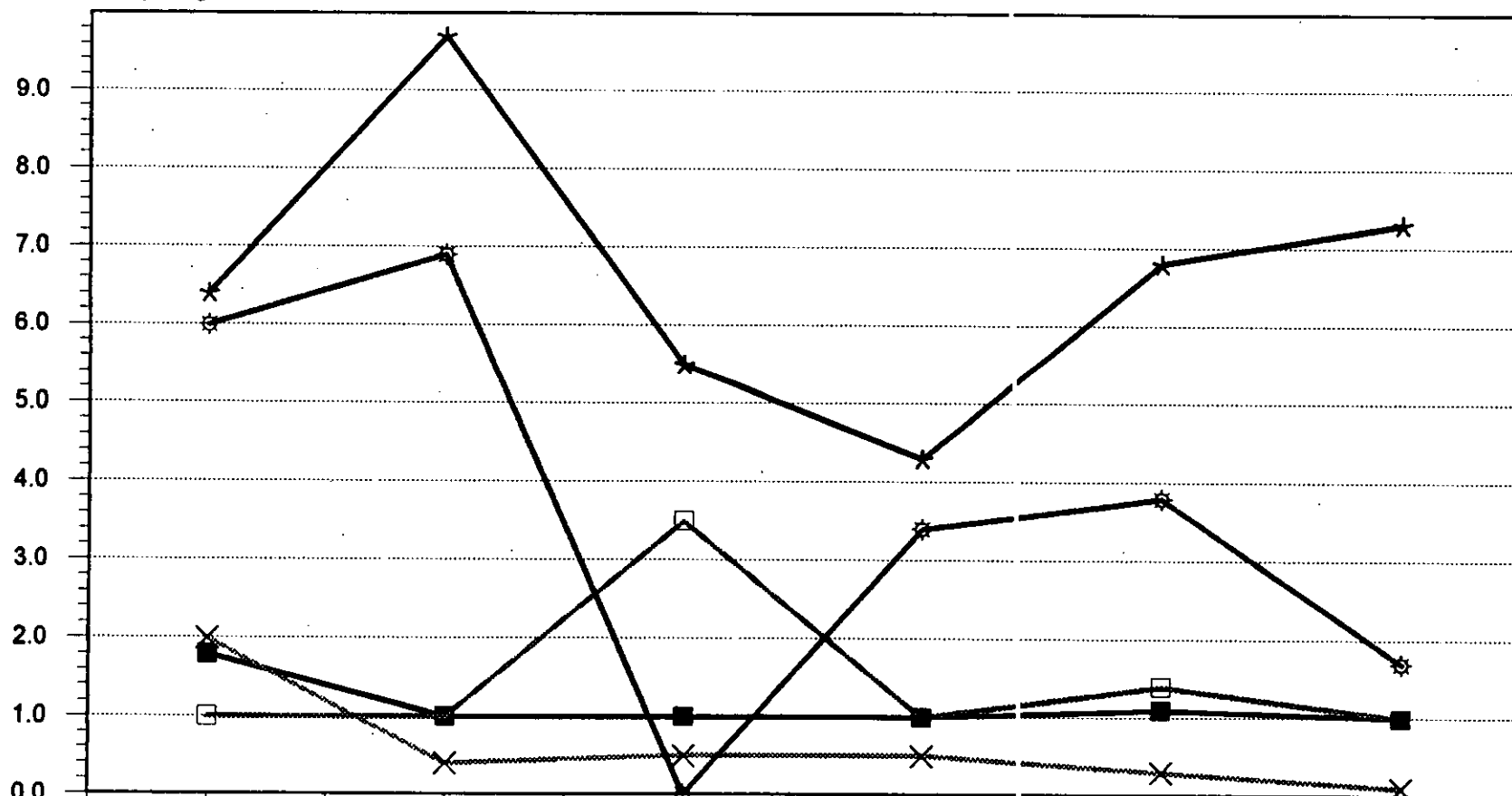
|                    | A= 0-35 | B11= 35-54 | B12= 54-85 | Bt21= 85-210 | Bt22= 210-270 | BC= 270-285 | Cx= 285+ |
|--------------------|---------|------------|------------|--------------|---------------|-------------|----------|
| Ca <sup>2+</sup> * | 8.1     | 9.8        | 7.7        | 6.0          | 7.3           | 9.0         | 7.3      |
| Mg <sup>2+</sup> ⊕ | 2.9     | 1.8        | 6.2        | 5.0          | 2.1           | 0.4         | 1.7      |
| Na <sup>+</sup> ⊕  | 1.5     | 0.8        | 1.0        | 0.8          | 1.5           | 1.4         | 1.0      |
| K <sup>+</sup> ×   | 1.4     | 3.5        | 0.5        | 0.3          | 3.5           | 3.5         | 0.1      |
| Al <sup>3+</sup> ■ | 1.8     | 2.5        | 2.2        | 1.8          | 1.8           | 1.0         | 3.7      |

# Propiedades Químicas

## Cationes Intercambiables

### PIII-2

M.eq/100g. de suelo



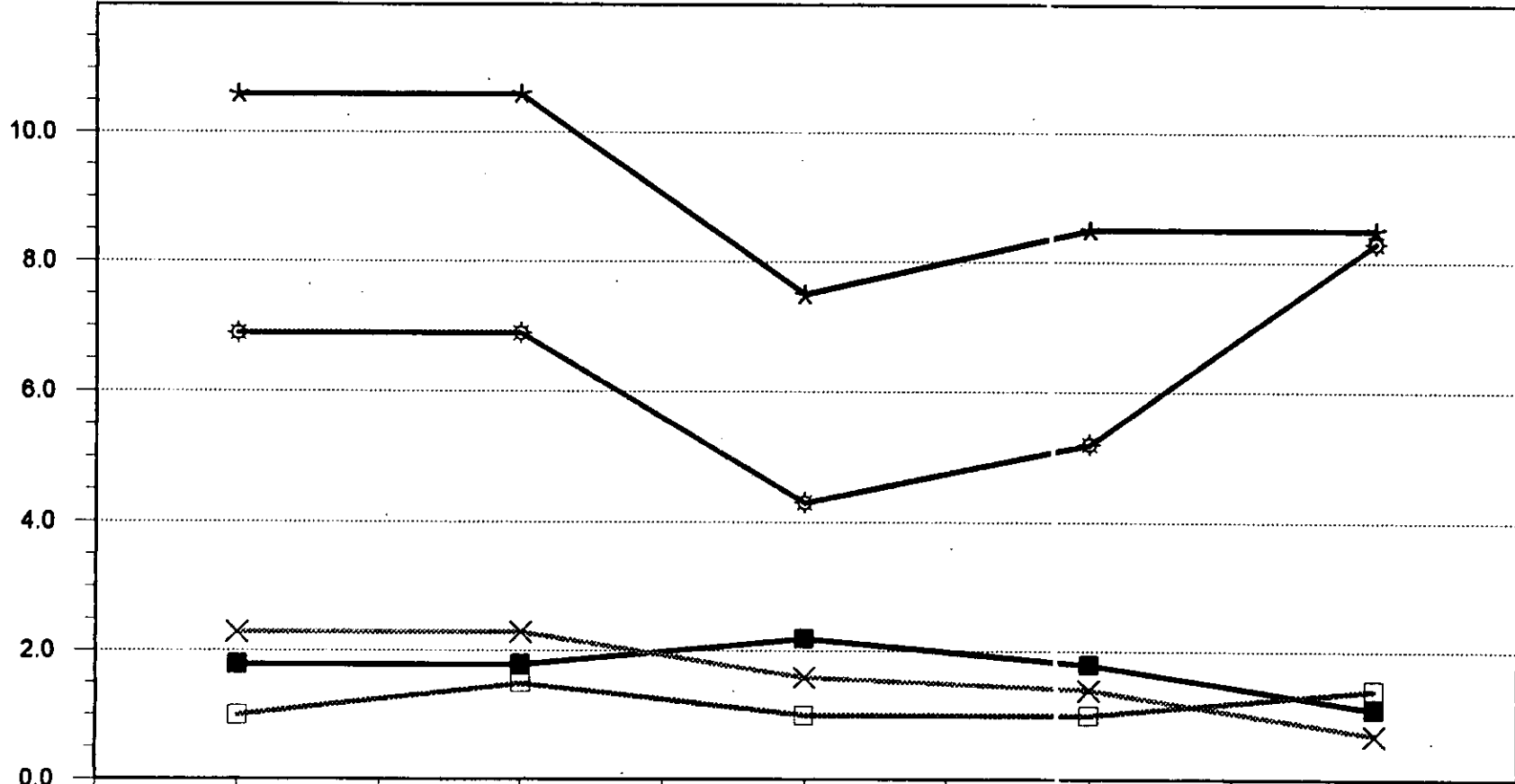
|                    | O= 0-10 | A11= 10-26 | A12= 26-42 | Bt2b= 42-90 | BCb= 90-125 | Cxb= 125-+ |
|--------------------|---------|------------|------------|-------------|-------------|------------|
| Ca <sup>2+</sup> ★ | 6.4     | 9.7        | 5.5        | 4.3         | 6.8         | 7.3        |
| Mg <sup>2+</sup> ✱ | 6.0     | 6.9        | 0.0        | 3.4         | 3.8         | 1.7        |
| Na <sup>+</sup> ✕  | 1.0     | 1.0        | 3.5        | 1.0         | 1.4         | 1.0        |
| k <sup>+</sup> ✕   | 2.0     | 0.4        | 0.5        | 0.5         | 0.3         | 0.1        |
| AL <sup>3+</sup> ■ | 1.8     | 1.0        | 1.0        | 1.0         | 1.1         | 1.0        |

# Propiedades Químicas

## Cationes Intercambiables

### PIII-3

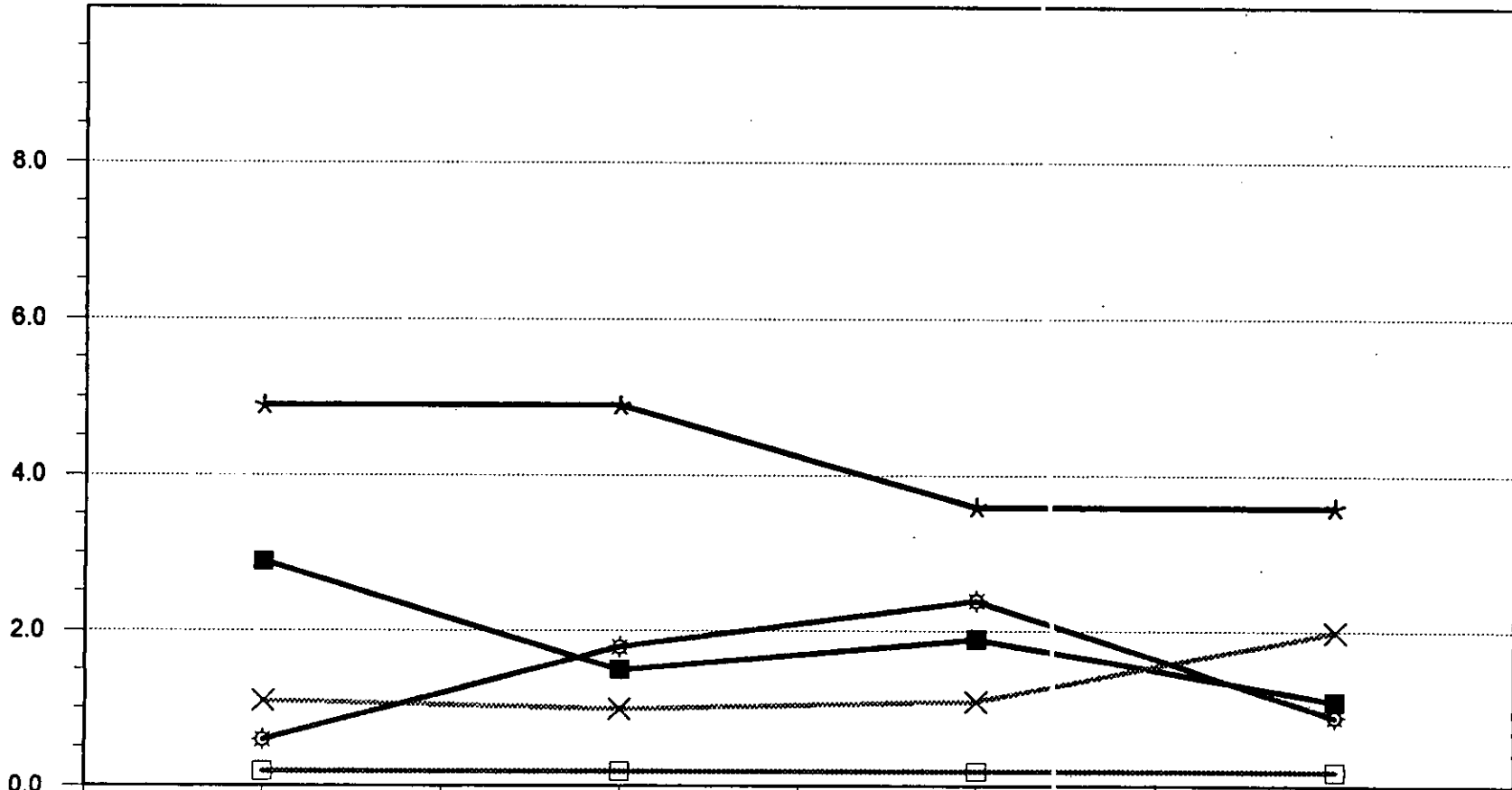
M.eq/100g de suelo



|                    | A= 0-10 | Bt21= 10-20 | Bt22= 20-28 | Cqin= 28-42 | C= 42-125 |
|--------------------|---------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Ca <sup>2+</sup> ★ | 10.6    | 10.6        | 7.5         | 8.5         | 8.5       |
| Mg <sup>2+</sup> ⊗ | 6.9     | 6.9         | 4.3         | 5.2         | 8.3       |
| Na <sup>+</sup> ✕  | 1.0     | 1.5         | 1.0         | 1.0         | 1.4       |
| K <sup>+</sup> ■   | 2.3     | 2.3         | 1.6         | 1.4         | 0.7       |
| AL <sup>3+</sup> ■ | 1.8     | 1.8         | 2.2         | 1.8         | 1.1       |

# Propiedades Químicas Cationes Intercambiables PIII-4

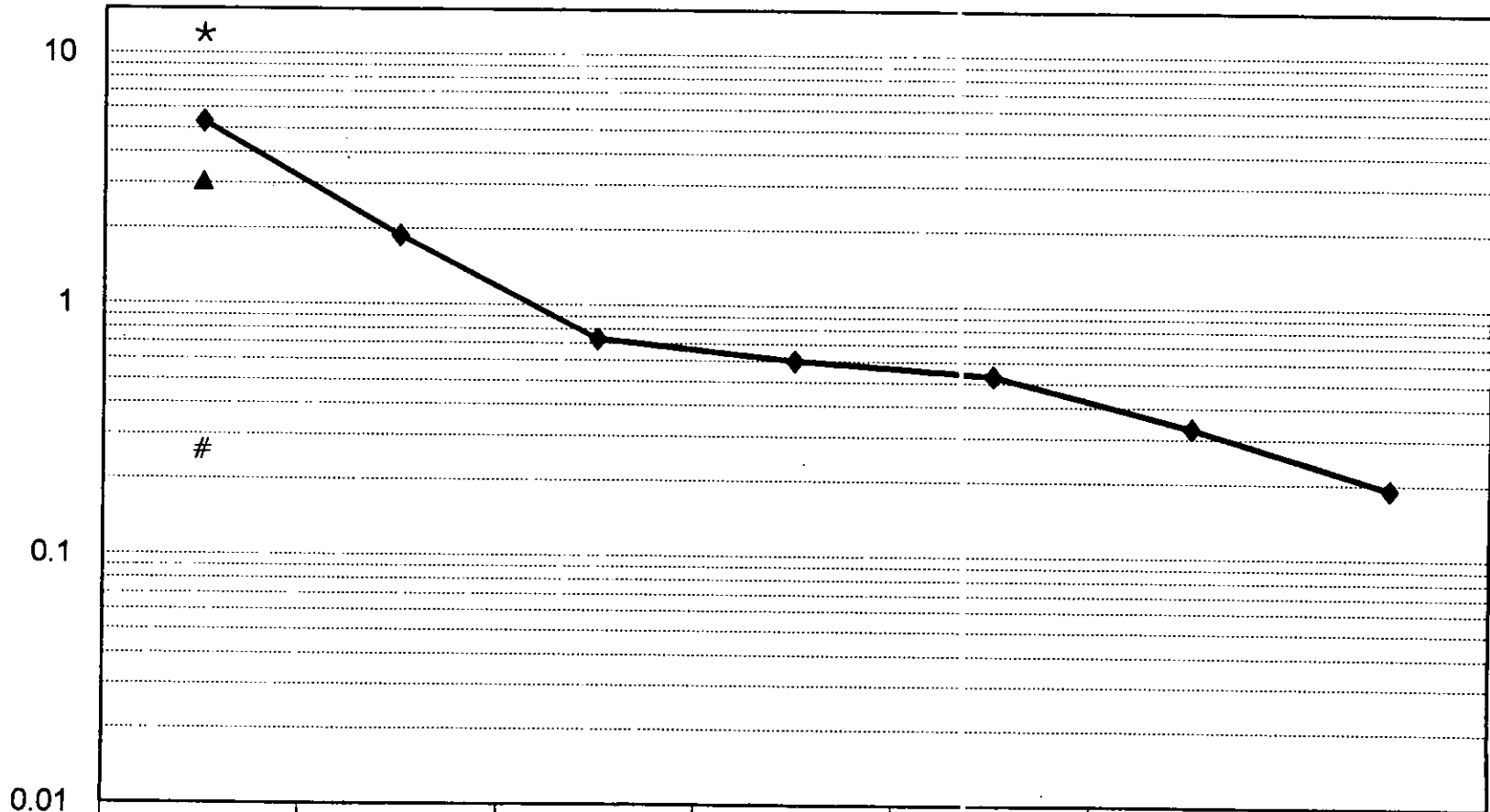
M. eq/100g de suelo



|                    | A= 0-15 | Bw= 15-44 | Cqm= 44-104 | C= 104-+ |
|--------------------|---------|-----------|-------------|----------|
| Ca <sup>2+</sup> ★ | 4.9     | 4.9       | 3.6         | 3.6      |
| Mg <sup>2+</sup> ⊕ | 0.6     | 1.8       | 2.4         | 0.9      |
| Na <sup>+</sup> †† | 0.2     | 0.2       | 0.2         | 0.2      |
| K <sup>+</sup> ✱   | 1.1     | 1.0       | 1.1         | 2.0      |
| AL <sup>3+</sup> ■ | 2.9     | 1.5       | 1.9         | 1.1      |



# Materia orgánica Relación Carbono-Nitrógeno PIII-1

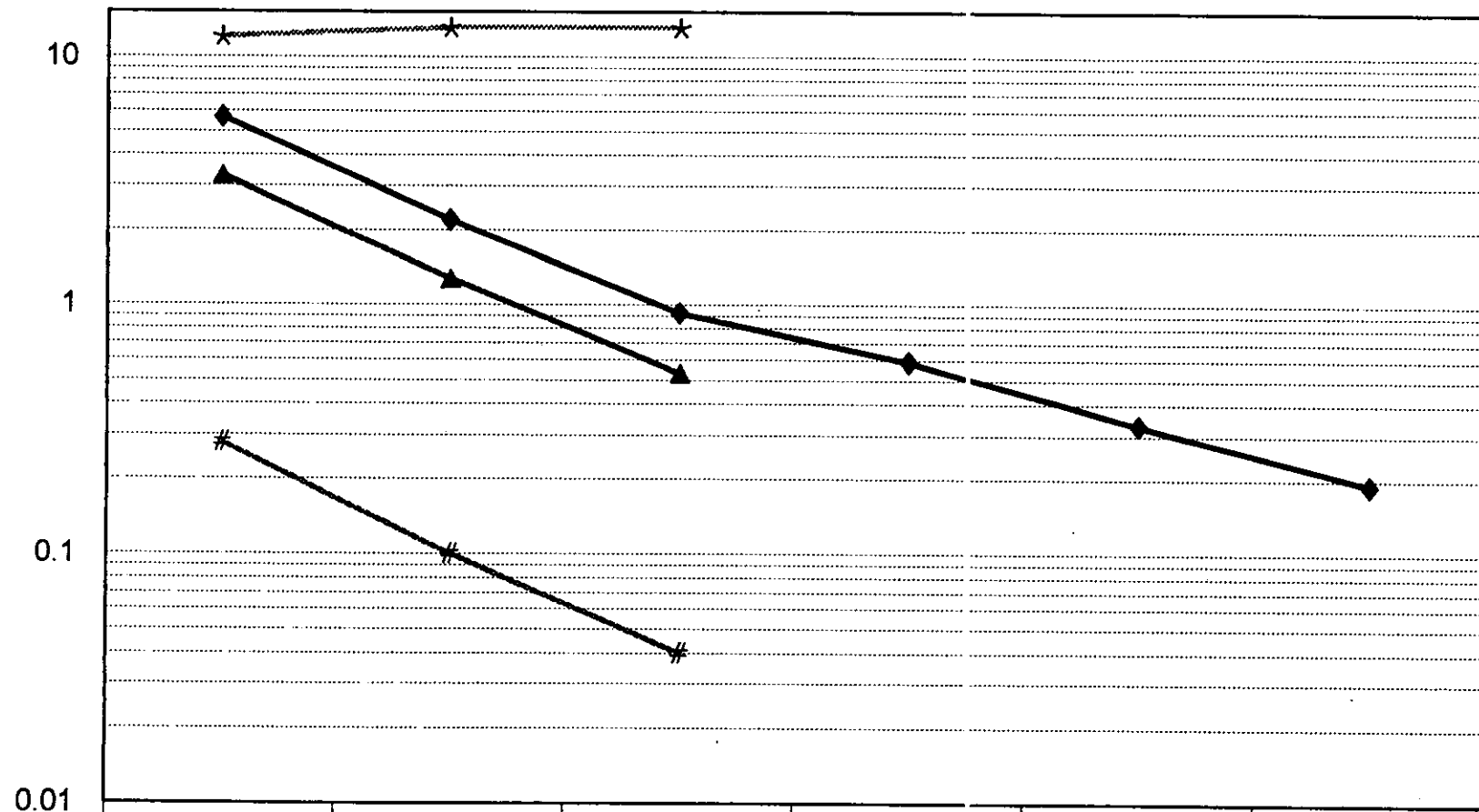


|             | A= 0-35 | B11= 35-54 | B12= 54-85 | Bt21= 85-210 | Bt22= 210-270 | BC= 270-285 | Cx= 285-+ |
|-------------|---------|------------|------------|--------------|---------------|-------------|-----------|
| M.o. ◆      | 5.29    | 1.87       | 0.73       | 0.6          | 0.53          | 0.33        | 0.19      |
| Carbono ▲   | 3.06    | 0          | 0          | 0            | 0             | 0           | 0         |
| Nitrógeno ■ | 0.26    | 0          | 0          | 0            | 0             | 0           | 0         |
| C/N ★       | 12      | 0          | 0          | 0            | 0             | 0           | 0         |

# Materia orgánica

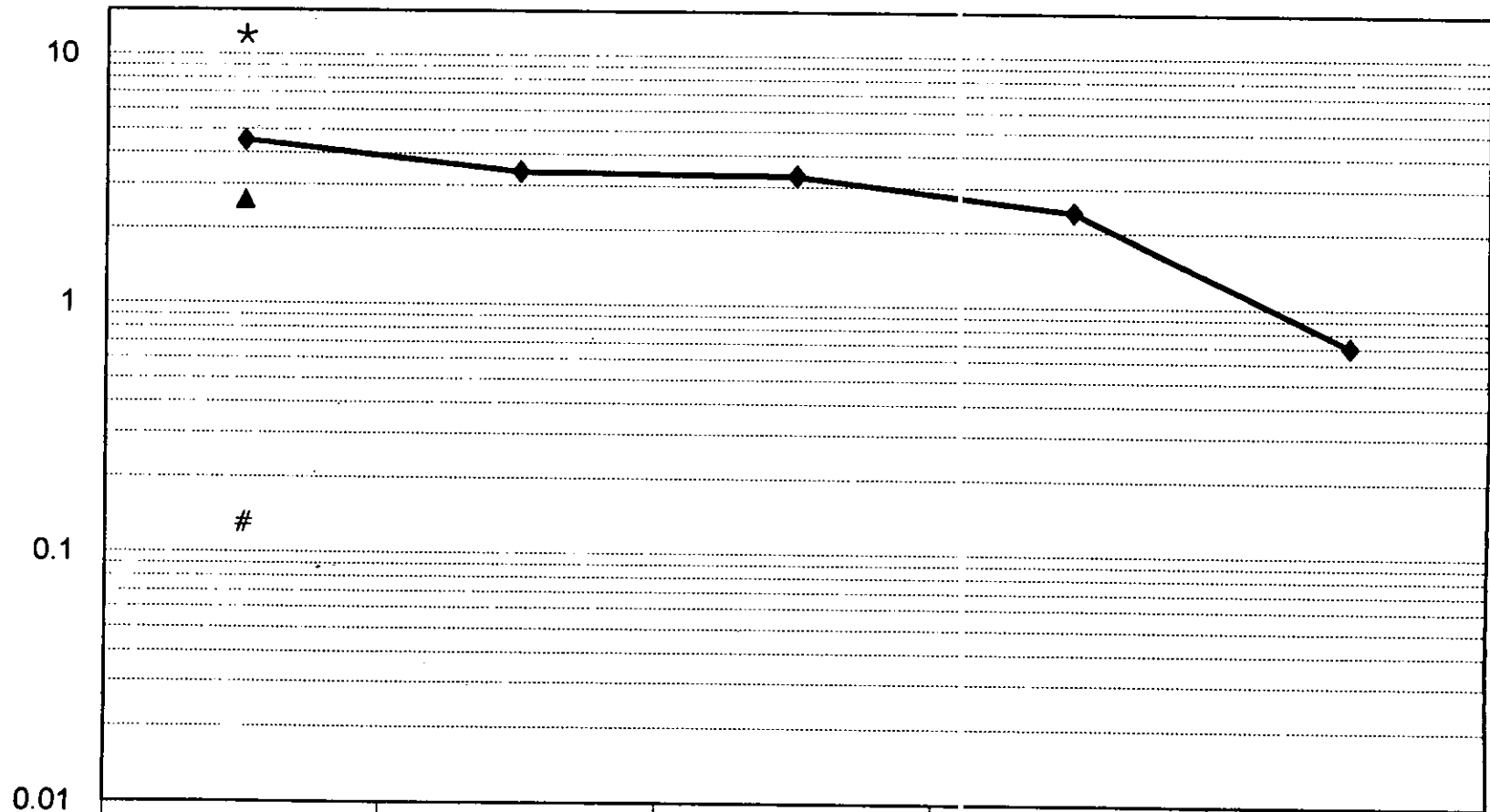
## Relación Carbono-Nitrógeno

### PIII-2



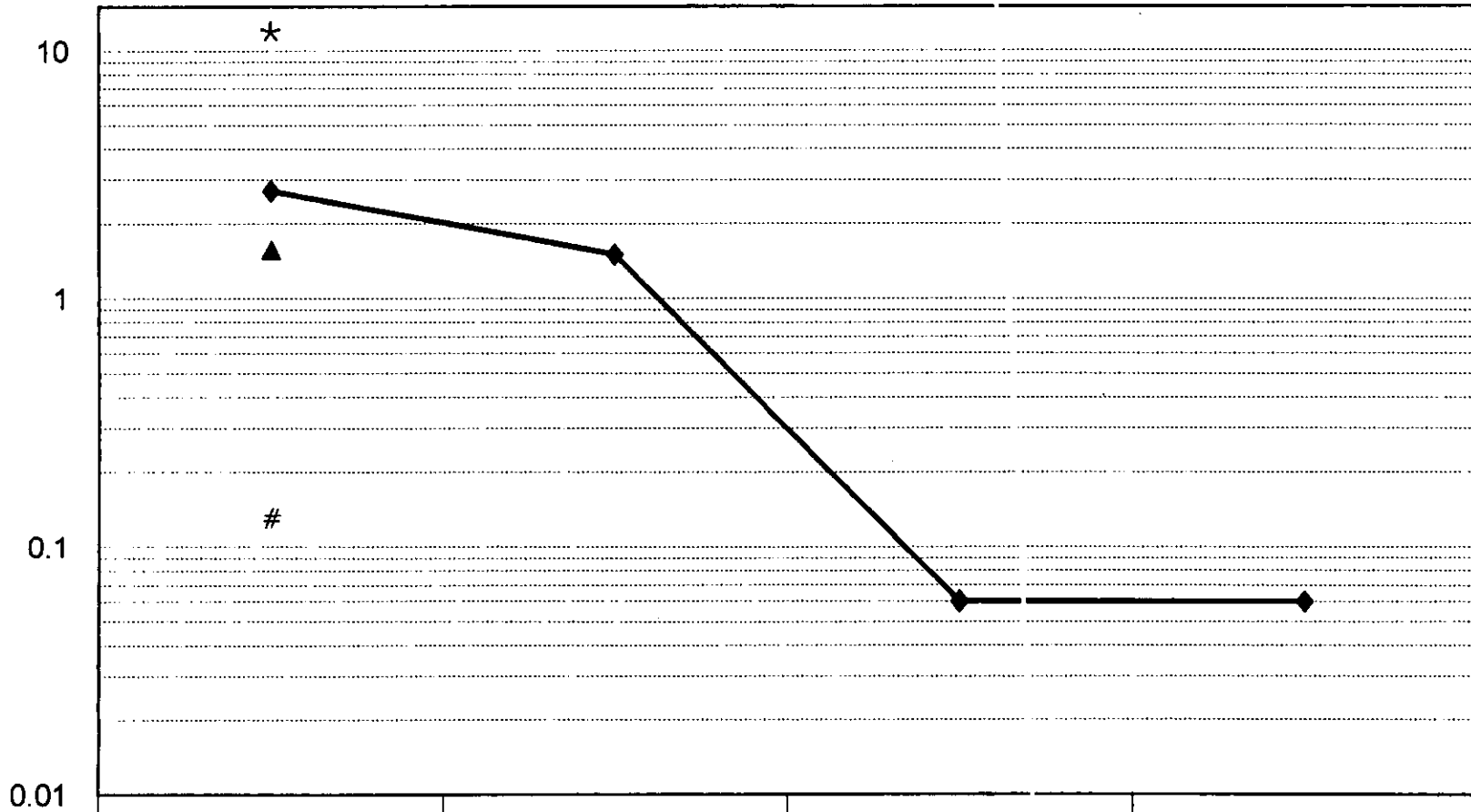
|             | O= 0-10 | A11= 10-26 | A12= 26-42 | Bt2b= 42-90 | BCb= 90-125 | CXb= 125-+ |
|-------------|---------|------------|------------|-------------|-------------|------------|
| M.o. ◆      | 5.7     | 2.19       | 0.92       | 0.59        | 0.33        | 0.19       |
| Carbono ▲   | 3.3     | 1.27       | 0.53       | 0           | 0           | 0          |
| Nitrógeno # | 0.28    | 0.1        | 0.04       | 0           | 0           | 0          |
| C/N ★       | 12      | 13         | 13         | 0           | 0           | 0          |

# Materia orgánica Relación Carbono-Nitrógeno PIII-3



|             | A= 0-10 | Bt21= 10-20 | Bt22= 20-28 | Cqm= 28-42 | C= 42-125 |
|-------------|---------|-------------|-------------|------------|-----------|
| M.o. ◆      | 4.5     | 3.4         | 3.3         | 2.4        | 0.7       |
| Carbono ▲   | 2.61    | 0           | 0           | 0          | 0         |
| Nitrógeno # | 0.13    | 0           | 0           | 0          | 0         |
| C/N ★       | 12      | 0           | 0           | 0          | 0         |

# Materia orgánica Relación Carbono-Nitrógeno PIII-4



|             | A= 0-15 | Bw= 15-44 | Cqm= 44-104 | C= 104-+ |
|-------------|---------|-----------|-------------|----------|
| M.o. ◆      | 2.7     | 1.5       | 0.06        | 0.06     |
| Carbono ★   | 1.56    | 0         | 0           | 0        |
| Nitrógeno ■ | 0.13    | 0         | 0           | 0        |
| C/N ☆       | 12      | 0         | 0           | 0        |