



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO

Instituto de Investigaciones Metalúrgicas  
Departamento de Geología y Mineralogía

Maestría  
GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

*“Propiedades Edáficas y su Relación con la Estabilidad  
de la Estructura de los Suelos de Angangueo”*

TESIS:

Para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS

Presenta

*Biól. MARTHA OLIVIA CORTES VARGAS*

Asesora interna:  
Dra. María Alcalá De Jesús

Asesora externa:  
Dra. Claudia Hidalgo Moreno

Morelia, Michoacán, Agosto de 2013.



## DEDICATORIA

Esta tesis la dedico a mis seres más amados, quienes me han apoyado en todas mis decisiones y que sin escatimar esfuerzo alguno, me han convertido en una profesionista y en una persona de bien. Con todo mi amor y agradecimiento para:

*Hortencia Vargas Juárez*

*Froylan Cortés Ferreyra*

*Blanca Vargas Juárez*

A mi madre, por ser una mujer fuerte en toda la extensión de la palabra y que a pesar de las pérdidas tan importantes que ha tenido en su vida, sigue adelante. Admiro tanto tu fortaleza mamá.

A mi padre y a mi tía, porque sé que me amaban tanto como yo a ustedes, por tenerme tan consentida, por dárme todo: papá extraño tanto que juegues conmigo; tía sabes que eres como una madre para mí, los necesito tanto.

*... Quizás han desaparecido de mi vida, pero nunca de mi corazón... Su fallecimiento cambió mi vida, pero mucho más lo hizo el tiempo que pasaron a mi lado...*

A mi abuela, hermana, sobrinos, tíos, primos, amigos y maestros, gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

Este proyecto fue concluido para todos ustedes con el invaluable apoyo de mi asesora de tesis que no se rindió, ni tampoco permitió que yo lo hiciera, gracias maestra Mary.

## *AGRADECIMIENTOS*

A CONACyT por su apoyo económico otorgado con la beca No de convocatoria 290611.

Al Laboratorio de Edafología (Edificio B-4) de la Facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por el espacio que se me permitió para la realización de la tesis.

A la Dra. María Alcalá de Jesús, por asesorar este trabajo con gran interés, por no dejar que me rindiera, por llevarme de la mano en todo momento, por su apoyo incondicional en los momentos más difíciles contribuyendo así, en mi crecimiento personal y profesional motivándome siempre a seguir adelante. Gracias por compartir conmigo sus conocimientos.

A la Dra. Claudia Hidalgo Moreno por su valiosa asesoría en los análisis químicos, por recibirme y apoyarme durante la estancia en el Colegio de Posgraduados, campus Montecillo.

Al Dr. Pedro Corona Chávez, por su apoyo, paciencia, consejos, disposición en todo momento, así como por sus valiosas sugerencias que enriquecieron este trabajo. Pero, sobre todo por haber creído en mí, muchas gracias.

Gracias al Ing. Sergio Barajas Acosta; Dr. Fco. Javier Ayala Pantoja; Dra. Isabel Israde Alcántara y al Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy por darme consuelo y no permitir que abandonara este proyecto.

A los integrantes de la comisión revisora: Dra. María Alcalá De Jesús, Dra. Claudia Hidalgo Moreno, Dr. Pedro Corona Chávez, Dr. Víctor Manuel Hernández y Dr. Alejandro Ávila, por sus acertadas sugerencias y consejos durante la realización de la tesis.

A la Dra. Carmen Castorena, M.C. Patricia Silva Sáenz y M.C. Juan Carlos González Cortez, por sus valiosas aportaciones y sugerencias sobre las dudas e inquietudes presentadas en este proyecto.

Al M.C. Neftalí Razo Pérez, por su asesoría sobre la difracción de rayos X, por sus consejos y disposición, gracias.

Gracias a Leodan, Juan Carlos Cuello, Luis Alfredo Vargas, Edgar Gallardo, Valerio Castro y Jonatan Torres, por la disposición prestada en el trabajo de campo.

Al personal del Laboratorio de Fertilidad y de Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos del Colegio de Postgraduados, por la capacitación que me brindaron para realizar algunos análisis de suelo.

Al Laboratorio de Interacción Planta-Suelo-Microorganismos del Instituto de Investigaciones Químico-Biológico de la U.M.S.N.H por la facilidad para el uso de equipo.

Gracias a todas las personas que participaron de manera directa o indirecta en la realización de este trabajo: Lenin Medina, Patricio Sánchez, Benjamín, Verenice Rivera, Gabriela Gómez, Miguel Ángel, Ana Elvira Licea, Mariela Casillas, Gerardo Barrera, Reyna y Fulgencio.

A los amigos que tuve la oportunidad de conocer durante la estancia realizada en el Colegio de Posgraduados: Leonel, Francisco, Diana, Giovanna, Mariana, Karla y José.

A Paty, Carmen, Brenda, Valdemar, Alejandra Ayala, Alejandra Cortés, Memo, Cesar, Daniel, Enrique, Tomas, Harim y Felipe por compartir conmigo la pasión por el atletismo, por la amistad y compañerismo mostrado en todo momento.

Agradezco a todos mis compañeros y amigos de la maestría en Geociencias y Planificación del Territorio (MGyPT) por contribuir de una u otra forma en mi crecimiento personal y profesional.

## ÍNDICE

| CONTENIDO  | página |
|--|--------|
| Índice de Cuadros.....   | vii    |
| Índice de Figuras.....   | viii   |
| Índice de Anexos.....  | x      |
| GLOSARIO.....  | xi     |
| RESUMEN.....   | xii    |
| ABSTRACT.....  | xiii   |
| 1. INTRODUCCIÓN.....   | 1      |
| 2. MARCO CONCEPTUAL.....   | 4      |
| 2.1. Suelo.....  | 4      |
| 2.2 Perfil de suelo.....   | 4      |
| 2.3. Horizontes.....   | 5      |
| 2.4. Capa.....   | 5      |
| 2.5. Proceso pedogenético.....   | 5      |
| 2.6. Horizontes, propiedades y materiales de diagnóstico.....                      | 5      |
| 2.7. Importancia de la clasificación de los suelos.....                            | 6      |
| 2.8. Sistemas de clasificación de suelos.....                                      | 6      |
| 2.9. Requerimientos de clasificación de los Andosoles.....                         | 9      |
| 2.9.1. Leyenda del Mapa de Suelos del Mundo (FAO-UNESCO, 1970).....                | 9      |
| 2.9.2. WRB: Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS-ISRIC-FAO, 2007)..... | 10     |
| 2.10. Propiedades edáficas.....  | 11     |
| 2.10.1. Estructura.....  | 11     |
| 2.10.2. Textura.....   | 11     |
| 2.10.3. Materia orgánica.....  | 12     |
| 2.10.4. Constituyentes amorfos.....  | 13     |
| 2.10.5. Arcillas.....  | 15     |
| 2.10.6. Limites de Atterberg.....  | 15     |
| 2.10.7. Estabilidad de agregados.....  | 16     |
| 3. ANTECEDENTES.....   | 18     |
| 3.1. Clasificación de suelos en México.....  | 18     |
| 3.1.1. Clasificación de suelos en Michoacán.....                                   | 19     |
| 3.2. Estabilidad de agregados.....   | 21     |
| 4. JUSTIFICACIÓN.....  | 24     |
| 5. OBJETIVOS.....  | 25     |
| 5.1. General.....  | 25     |
| 5.2. Específicos.....  | 25     |

|   | página |
|---|--------|
| 6. HIPÓTESIS.....   | 25     |
| 7. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....                             | 26     |
| 7.1. Localización Geográfica.....                                   | 26     |
| 7.2. Fisiografía.....   | 26     |
| 7.3. Geología.....  | 27     |
| 7.4. Litología.....   | 29     |
| 7.5. Clima.....   | 30     |
| 7.6. Suelos.....  | 32     |
| 7.7. Vegetación.....  | 34     |
| 8. METODOLOGIA.....   | 37     |
| 8.1. Selección de Sitios de Muestreo.....                           | 37     |
| 8.2. Trabajo de campo.....  | 39     |
| 8.2.1. Descripción de sitios y muestreo de suelos.....              | 39     |
| 8.3. Trabajo de laboratorio.....                                    | 39     |
| 8.3.1. Propiedades de los suelos en la fracción de tierra fina..... | 39     |
| 8.3.1.1. Físicas.....   | 40     |
| 8.3.1.2. Químicas.....  | 40     |
| 8.3.1.3. Mineralógicas.....   | 42     |
| 8.4. Trabajo de gabinete.....                                       | 43     |
| 8.4.1. Clasificación de Suelos.....                                 | 43     |
| 8.4.2. Análisis estadístico.....                                    | 44     |
| 9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                                      | 44     |
| 9.1. Descripción de los suelos.....                                 | 44     |
| 9.1.1. Sitio y Perfil Uno.....                                      | 44     |
| 9.1.1.1. Descripción del sitio.....                                 | 44     |
| 9.1.1.2. Caracterización morfológica.....                           | 47     |
| 9.1.1.3. Propiedades físicas y químicas.....                        | 49     |
| 9.1.1.4. Descripción mineralógica.....                              | 50     |
| 9.1.2. Sitio y Perfil Dos.....                                      | 51     |
| 9.1.2.1. Descripción del sitio.....                                 | 51     |
| 9.1.2.2. Caracterización morfológica.....                           | 51     |
| 9.1.2.3. Propiedades físicas y químicas.....                        | 53     |
| 9.1.2.4. Descripción mineralógica.....                              | 54     |
| 9.1.3. Sitio y Perfil Tres.....                                     | 55     |
| 9.1.3.1. Descripción del sitio.....                                 | 55     |
| 9.1.3.2. Caracterización morfológica.....                           | 55     |
| 9.1.3.3. Propiedades físicas y químicas.....                        | 57     |
| 9.1.3.4. Descripción mineralógica.....                              | 57     |
| 9.1.4. Sitio y Perfil Cuatro.....                                   | 58     |
| 9.1.4.1. Descripción del sitio.....                                 | 58     |

|  | página |
|--|--------|
| 9.1.4.2. Caracterización morfológica.....  | 59     |
| 9.1.4.3. Propiedades físicas y químicas.....   | 60     |
| 9.1.4.4. Descripción mineralógica.....   | 61     |
| 9.1.5. Sitio y Perfil Cinco.....   | 62     |
| 9.1.5.1. Descripción del sitio.....  | 62     |
| 9.1.5.2. Caracterización morfológica.....  | 62     |
| 9.1.5.3. Propiedades físicas y químicas.....   | 63     |
| 9.1.5.4. Descripción mineralógica.....   | 64     |
| 9.2. Clasificación de suelos   |        |
| WRB: Base Referencia Mundial del Recurso Suelo: FAO-ISRRIC-SICS (2007)...  | 65     |
| 9.2.1. Horizontes de diagnóstico.....  | 65     |
| 9.2.2. Propiedades de diagnóstico.....   | 66     |
| 9.2.3. Grupos, unidades y calificadores de suelos.....   | 68     |
| 9.2.4. Descripción de los suelos clasificados al Oriente de Michoacán.....   | 70     |
| 9.2.5. Clasificación de suelos con la WRB (2007) y con la Leyenda<br>Original del Mapa Mundial de Suelos (1970)..... | 73     |
| 9.3. Propiedades edáficas relacionadas con la estabilidad de agregados.....  | 74     |
| 9.3.1. Textura.....  | 74     |
| 9.3.2. Materia orgánica.....   | 76     |
| 9.3.3. Constituyentes amorfos.....   | 78     |
| 9.3.3.1. Alófono.....  | 78     |
| 9.3.3.2. Imogolita.....  | 80     |
| 9.3.3.3. Ferrihidrita.....   | 81     |
| 9.3.3.4. Complejos órgano-minerales.....   | 82     |
| 9.3.3.5. Análisis estadístico.....   | 83     |
| 9.3.4. Arcillas.....   | 84     |
| 9.3.5. Límites de Atterberg.....   | 86     |
| 9.3.6. Estabilidad de agregados.....   | 90     |
| 9.3.7. Análisis estadístico.....   | 94     |
| 9.3.7.1. Macro, meso y macroagregados y factores que influyen en su<br>estabilidad.....                              | 94     |
| 9.3.7.2. Diámetro Medio Ponderado (DMP) y factores que influyen en<br>la estabilidad de los agregados.....           | 96     |
| 10. CONCLUSIONES.....  | 99     |
| 11. RECOMENDACIONES.....   | 101    |
| 12. LITERATURA CITADA.....   | 102    |
| ANEXOS.....  | 108    |

## ÍNDICE DE CUADROS

|            |   | página |
|------------|---|--------|
| Cuadro 1.  | Localización de los sitios de muestreo en el Oriente de Michoacán.....  | 38     |
| Cuadro 2.  | Clases de estabilidad de agregados propuesto por Le Bissonnais y Le Souder (1995).....  | 40     |
| Cuadro 3.  | Criterios que definen la presencia de minerales amorfos y órgano-minerales (Tomado de Alcalá, 2003).....                                      | 42     |
| Cuadro 4   | Morfología en suelos al Oriente de Michoacán.....   | 45     |
| Cuadro 5.  | Propiedades físicas y químicas de suelos estudiados en el Oriente de Michoacán.....   | 46     |
| Cuadro 6.  | Descripción de vidrio volcánico en suelos del Oriente de Michoacán con apoyo del microscopio óptico de luz polarizada en el objetivo 10X..... | 47     |
| Cuadro 7.  | Clasificación de los suelos con la WRB: Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (FAO-ISRIC-SICS, 2007).....                                | 68     |
| Cuadro 8.  | Grupos, unidades y calificadores con la WRB (2007) para los suelos del Oriente de Michoacán.....  | 70     |
| Cuadro 9.  | Promedio de porcentajes de las partículas del suelo.....  | 74     |
| Cuadro 10. | Al, Fe y Si extraídos mediante el análisis químico por disolución selectiva en la fracción de la tierra fina de los suelos estudiados...      | 79     |
| Cuadro 11. | Relaciones que indican la presencia y porcentaje de minerales amorfos en los perfiles de suelo estudiados.....                                | 80     |
| Cuadro 12. | Significancia estadística entre los complejos de Humus Al y Fe con la MO y el pH.....   | 83     |
| Cuadro 13. | Tipos de arcilla identificadas mediante DRX en suelo total.....   | 85     |
| Cuadro 14. | Límites de consistencia y plasticidad de los suelos del Oriente de Michoacán.....   | 87     |
| Cuadro 15. | Distribución de agregados estables en agua por tamaño de acuerdo con el método de Yoder (1936).....   | 91     |
| Cuadro 16. | Regresión lineal múltiple a partir de la relación entre los macroagregados del suelo y los factores que influyen en su estabilidad.....       | 95     |

|   | página |
|---|--------|
| Cuadro 17. Estabilidad de agregados de acuerdo con el Diámetro Medio Ponderado (DMP)..... | 97     |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Sistemas de Clasificación de Suelos, tomado de Cortés (2010).....   | 7  |
| Figura 2. Mapa de ubicación de los municipios en donde se estudiaron los suelos del Oriente de Michoacán.....   | 26 |
| Figura 3. Localización del Cinturón Volcánico Trans-mexicano y ubicación de los sitios de muestreo en el Oriente de Michoacán. Extracto del atlas geográfico del estado de Michoacán (Correa-Pérez, 2003).... | 27 |
| Figura 4. Extracto del mapa geológico del sector central del CVTM, escala 1:300 000 realizado por Pasquaré et al (1991) y ubicación de los sitios de muestreo.....  | 28 |
| Figura 5. Mapa de clima para el área de estudio. Extracto del Atlas Geográfico del estado de Michoacán (Correa-Pérez, 2003).....  | 30 |
| Figura 6. Mapa de precipitación media anual para el área de estudio. Extracto del Atlas Geográfico del estado de Michoacán (Correa-Pérez, 2003).....  | 31 |
| Figura 7. Unidades de suelo de los sitios de estudio en el Oriente de Michoacán. Extracto del Atlas Geográfico del estado de Michoacán (Correa-Pérez, 2003).....  | 32 |
| Figura 8. Mapa de vegetación de los sitios estudiados en el Oriente de Michoacán Extracto del Atlas Geográfico del Estado de Michoacán (Correa-Pérez, 2003).....  | 34 |
| Figura 9. Bosque de <i>Abies</i> (oyamel) (A); bosque de <i>Pinus</i> (B); bosque de <i>Quercus</i> (encino) (C). Fotografías: M.C. Patricia Silva Sáenz.....   | 36 |
| Figura 10. Cuadro sinóptico que muestra en forma resumida las tres etapas en la que fue dividida la metodología.....  | 37 |
| Figura 11. Ubicación de los sitios de muestreo y perfiles de suelo en el Oriente de Michoacán. Imagen tomada de Google Earth (2010).....  | 38 |
| Figura 12. Espectroscopio de absorción atómica.....   | 41 |

|  | página |
|--|--------|
| Figura 13. Imagen del microscopio óptico de luz polarizada utilizado para la cuantificación del V V(a). Equipo de Difracción de Rayos SIEMENS-500 (b).....   | 43     |
| Figura 14. Morfología del Perfil 1: (a) estructura granular y pequeños bloques subangulares de consistencia friable; (b) raíces muy abundantes; (c) fragmentos de roca; (d) fragmentos de roca pequeños y gravas.  | 48     |
| Figura 15. Difractograma que representa los minerales primarios y secundarios del Perfil 1 (Cerro “El Cacique”).....   | 51     |
| Figura 16 Morfología del Perfil 2: (a) presencia de carbón vegetal suelto; (b) raíces comunes y muy raras, gruesas y delgadas; (c) agregados con hifas agrupadas formando micelios; (d) estructura granular de moderado desarrollo; (e) estructura en bloques subangulares; (f) estructura columnar..... | 52     |
| Figura 17. Difractograma que representa los minerales primarios y secundarios del Perfil 2 (Cerro “El Campanario”).....  | 55     |
| Figura 18. Morfología del Perfil 3: (a) estructura granular y color oscuro por el proceso de melanización; (b) presencia de raíces en abundante cantidad; (c) bloques subangulares de consistencia friable; (d) presencia de carbón vegetal en los horizontes C.....                                     | 56     |
| Figura 19. Difractograma que representa los minerales primarios y secundarios del Perfil 3 (Cerro “El Catingon”).....  | 58     |
| Figura 20. Morfología del Perfil 4. (a) estructura granular y de bloques subangulares de consistencia friable; (b) presencia de fauna (ciempiés); (c) pocas piedras de forma subangular; (d) pocas raíces delgadas; (e) presencia de cuarzo; (f) abundante carbón.....                                   | 59     |
| Figura 21. Difractograma que representa los minerales primarios y secundarios del Perfil 4 (Cerro “Guadalupe”).....  | 62     |
| Figura 22. Morfología del Perfil 5. (a) presencia de abundantes raíces; (b) estructura granular y en bloques subangulares; (c) actividad de fauna que genera canales; (d y e) presencia de carbón vegetal.....   | 63     |
| Figura 23. Difractograma que representa los minerales primarios y secundarios del Perfil 5 (Cerro “El Melón”).....   | 65     |
| Figura 24. Vidrio volcánico: (a) luz polarizada plana y (b) luz polarizada cruzada.....  | 67     |

|  | página |
|--|--------|
| Figura 25. Vidrio volcánico que representa a los Perfiles 2 y 4 impregnando a otros minerales: (a) luz polarizada plana y (b) luz polarizada cruzada.....  | 67     |
| Figura 26. Clasificación de los suelos estudiados al oriente de Michoacán, de acuerdo con la WRB (2007).....   | 69     |
| Figura 27. Porcentajes de arena, limo y arcilla en relación con la profundidad de los suelos.....  | 76     |
| Figura 28. Porcentajes de materia orgánica en relación con la profundidad de los suelos.....   | 77     |
| Figura 29. Relación del contenido de Ald y Alo (a) y Fed y Feo (b) de los suelos del Oriente de Michoacán.....   | 81     |
| Figura 30. Relaciones entre la materia orgánica y, el Alp/Ald (a) y Fep/Fed (b); el pH y Alp/Ald (c) y Fep/Fed (d).....                                    | 84     |
| Figura 31. Diagrama de plasticidad de los suelos del Oriente de Michoacán...   | 88     |
| Figura 32. Distribución de estabilidad de agregados en los suelos.....   | 92     |
| Figura 33. Clases de estabilidad de agregados en húmedo de acuerdo con el DMP propuesto por Le Bissonnais y Le Souder (1995) en los suelos estudiados..... | 93     |
| Figura 34. Diámetro medio ponderado en relación con la profundidad de los suelos.....  | 94     |
| Figura 35. Variación del DMP con: arena (a); limo (b); Al + ½ Fe (c); Ferrihidrita (d); y la Materia orgánica (e).....                                     | 98     |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| Anexo 1. Descripción morfológica y datos analíticos de los suelos estudiados.....            | 109 |
| Anexo 2. Requerimientos de los horizontes y propiedades de diagnóstico.....                  | 121 |
| Anexo 3. Requerimientos de las Unidades y Calificadores de los Suelos con la WRB (2007)..... | 122 |

## **GLOSARIO**

**INEGI.** Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

**ISRIC.** Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos.

**IUSS- ISRIC-FAO.** Unión Internacional de las Ciencias del Suelo – Centro Internacional e Información de Suelos – Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

**NOM.** Norma Oficial Mexicana.

**WRB.** Base Referencial Mundial del Recurso Suelo.

## RESUMEN

Al Oriente del estado de Michoacán, existen suelos de origen volcánico reportados como Andosoles que por su naturaleza, ubicación topográfica y cambio de uso del suelo, son susceptibles de perder la estabilidad de sus agregados de manera paulatina o drástica ante fenómenos hidrometeorológicos.

El objetivo de este estudio fue clasificar los suelos de cinco laderas localizadas al Oriente de Michoacán y definir la estabilidad de sus agregados como posible indicador en la precipitación de los deslizamientos de masa ocurridos en el año 2010 en las poblaciones de Anganguero, Ocampo y Zitácuaro, Mich. Se determinaron las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los suelos de acuerdo con el ISRIC (1995); se clasificaron los suelos con el Sistema de Clasificación WRB (Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, 2007) y se determinó la estabilidad de los agregados de los suelos con el método de Yoder (1936).

Se clasificaron cuatro suelos como Andosoles (dos Andosoles silándico úmbricos y dos Andosoles vítrico úmbricos) y un Leptosol vítrico. Cuatro de cinco suelos clasificados como Andosoles coinciden con lo reportado por el INEGI.

La estabilidad de los agregados con base en el diámetro medio ponderado se clasificó en tres clases: i) muy estables, mayores de 2 mm (Perfiles 1, 2 y 3), ii) estables, de 1.3 a 2.0 mm (Perfil 4) y iii) moderadamente estables, de 0.8 a 1.3 mm (Perfil 5). Existe una correlación estadísticamente significativa entre los agregados muy estables con el  $Al + 1/2Fe$  (alófano, imogolita), la ferrihidrita y la materia orgánica.

En la estabilidad de los agregados participan varias propiedades físicas y químicas, pero en presencia de factores externos como el exceso de agua y áreas de fuerte inclinación, se desestabilizan, por lo que podrían influir de manera directa en la precipitación de los deslizamientos de materiales de las laderas de los suelos del Oriente de Michoacán.

## **ABSTRACT**

There are some volcanical Andosol soils, located at western Michoacan, that can easily loose their stability with hydrometeorological phenomena due to their intrinsic properties, topography and change of use of land.

The main purpose of this study was to classify the soils from five hillsides at western Michoacan and to define the stability of its aggregates, in order to find the relationship with the landslides occurred in 2010 at Angangueo, Ocampo and Zitácuaro, caused by atypical rains in this region. We determined the physical, chemical and mineralogical properties of the soils according to the ISRIC (1995), and then classified the soils with the WRB System (World Reference Base for Soil Resources, 2007). After that we determined the stability of the soil aggregates with the Yoder method (1936).

Four of the five soils were classified as Andosols (two Umbric Silandic Andosols and two Umbric Vitric Andosols), and one soil was identified as Vitric Leptosol. These were the same results that INEGI reported.

The stability of the aggregates was determined according to the average diameter in three types: i) very stable, larger than 2 mm (Profiles 1, 2 and 3); ii) stable, from 1.3 to 2.0 mm (Profile 4); and iii) moderately stable, from 0.8 to 1.3 mm (Profile 5). There is a significant statistical correlation between the very stable aggregates with the Al + 1/2Fe (alophane, impoglite), the ferrhydrite and the organic matter.

The stability of the aggregates mostly depend on the physical and chemical properties of the soils, but some external factors, like large amounts of water or very steep slopes, can also affect their stability and have a direct influence on the natural hazards, like the landslides that occurred in the soils of the western part of Michoacán.

## 1. INTRODUCCIÓN

El suelo es uno de los recursos naturales de gran importancia y utilidad para el hombre, sin embargo, debido al manejo y el cambio de uso que hace el humano, éste se deteriora y sus propiedades físicas y químicas cambian. Para realizar una evaluación del deterioro y/o modificación de los procesos pedogenéticos que un suelo ha sufrido se debe partir de su descripción y clasificación. Clasificar a un suelo es ordenar y agrupar sus propiedades en niveles jerárquicos dentro de grupos o clases, de acuerdo con sus diferencias y semejanzas con un Sistema de Clasificación.

Es importante mencionar que los inventarios de suelos deben estar en constante actualización, debido a que las propiedades de éstos cambian a través del tiempo y hasta pueden perderse, ya sea por el cambio de uso del suelo de forestal a agrícola o por las condiciones topográficas (laderas de cerro con pendientes fuertes), geológicas y climáticas. Bajo estas condiciones, los factores externos como la sismicidad y específicamente para la zona Oriente de Michoacán, las lluvias intensas ocurridas en febrero de 2010, actuaron como un factor de disparo que perturbó el equilibrio de las laderas en donde los suelos reportados como Andosoles junto con la vegetación que soportaban y el material que les subyacía, fueron removidos por los deslizamientos ocurridos.

Por lo anterior es importante registrar las propiedades de los suelos y darles nombre con el sistema de clasificación más reciente adoptado en México (Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, 2007) con el fin de tener información actual y confiable sobre las propiedades físicas y químicas que sirvan de referencia en la toma de decisiones.

La estructura es una propiedad física relacionada con los procesos de formación y desarrollo del suelo. Sus partículas elementales (arena, limo, arcilla) y materia orgánica se unen para formar agregados. Los agregados son grupos de partículas minerales y orgánicas unidas unas a otras con intersticios entre sí denominados poros o superficies de debilidad (Porta *et al.*, 1999). La formación de los agregados y su estabilidad varía para los diferentes tipos de suelos y depende de: i) factores orgánicos como la materia orgánica (Hermawan y Bomke, 1997); ii) factores inorgánicos como los suelos de textura arcillosa (Montenegro, 1991), especialmente los expandibles por su alto potencial iónico (Narro, 1994), minerales amorfos como el alofano, imogolita, ferrihidrita (Parfitt y Clayden, 1991); iii) y, de los complejos amorfos órgano-minerales de Al-Fe-humus (Barreal *et al.*, 2001; Schwertmann y Taylor, 1989) así como de la humedad del suelo.

Uno de los indicadores del estado estructural del suelo es la estabilidad de sus agregados (Martínez-Trinidad *et al.*, 2008) y la habilidad que éstos tienen para conservar su forma y evitar su ruptura cuando se humedecen (Narro, 2004). Diversos autores coinciden en señalar que la estabilidad de los agregados del suelo se refiere principalmente a la relación que existe entre la materia orgánica y la textura en la capa arable de suelos agrícolas y a veces en suelos forestales. Por otro lado, otros autores han estudiado la estabilidad de los agregados por medio de la relación entre los minerales amorfos (alófano, ferrihidrita y complejos órgano-minerales) y las arcillas silicatadas, siendo escasos aquéllos trabajos que han considerado varios factores para explicar la estabilidad de dichos agregados.

Recientemente se han realizado diversos estudios sobre la estabilidad de suelos y su relación con la posibilidad y ocurrencia de fenómenos de deslizamientos de masa en

laderas. En particular, se ha encontrado que los suelos son excelentes indicadores en aquellos deslizamientos de tipo de translacional o de flujos de detritos, como aquellos que ocurrieron en la región de Angangueo en el año de 2010.

En este trabajo se propone la caracterización física, química y mineralógica, la clasificación, así como el estudio de la estabilidad de los agregados de los suelos en cinco laderas localizadas al Oriente de Michoacán con el propósito de comprender su relación e influencia en los deslizamientos ocurridos en el año 2010 y su potencial recurrencia en la zona de estudio.

Es oportuno mencionar que el actual título de esta tesis se debe a su registro inicial, el cual por razones administrativas no ha sido posible cambiarlo, sin embargo, de acuerdo con los objetivos y resultados obtenidos, se considera que el título del presente estudio corresponde al de: **Clasificación de suelos y estabilidad de agregados en áreas de deslizamiento del Oriente de Michoacán.**

## **2. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.1. Suelo**

El suelo, una capa delgada y frágil de la superficie de la Tierra fundamental para la vida en el planeta es considerado como un recurso natural no renovable a corto plazo. Chadwick y Graham (2000) lo describen como una mezcla de material geológico, organismos vivos y los residuos de su interacción que le confiere a éste características polifásicas, heterogéneas, dispersivas y de porosidad. También señalan que su estudio requiere conocer su formación (propiedades físicas, químicas, biológicas y mineralógicas), su comportamiento, así como su clasificación, manejo y conservación.

De acuerdo con el Soil Survey Staff (2010), el suelo es un cuerpo natural, conformado por sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren en la superficie de la Tierra. Ocupa un espacio y se caracteriza por tener horizontes o capas que se distinguen del material de origen como resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y, transformaciones de energía y materia o por la habilidad de soportar plantas enraizadas en un ambiente natural.

A continuación, se presentan los siguientes conceptos utilizados en el apartado de clasificación de suelos de acuerdo con el Soil Survey Staff (2010).

### **2.2. Perfil de suelo**

Es una sección vertical del suelo que muestra un conjunto de horizontes y capas que han sido alterados durante el proceso de formación y se diferencian entre sí por sus características físicas, químicas y mineralógicas.

### 2.3. Horizontes

Son estratos paralelos a la superficie del suelo que ocurren en cierta profundidad y se diferencian entre sí a través de las características que presentan por los procesos de formación del suelo.

- **Epipedón** (Del griego, *epi*, sobre y *pedón*, suelo). Es un horizonte que se forma en la superficie del suelo y en el cual, la estructura de la roca se ha intemperizado en gran parte y, muestra un color oscuro debido a la materia orgánica y evidencia de eluviación.

- **Endopedón** (Del griego, *endo*, bajo y *pedón*, suelo). Es un horizonte que subyace al epipedón u horizonte superficial, el cual muestra evidencia de iluviación de materiales.

### 2.4. Capa

Las capas no se consideran como parte de un suelo bien formado, debido a que aún muestran características del material inicial.

### 2.5. Proceso pedogenético

La formación de un suelo es el resultado de la acción combinada de muchos procesos que transforman una roca o un material en suelo como: el clima, los organismos vivos, el relieve y el tiempo, y éstos a su vez determinan la dirección, velocidad y duración de los procesos formadores (Porta *et al.*, 2003).

### 2.6. Horizontes, propiedades y materiales de diagnóstico

El término diagnóstico, requiere de un espesor mínimo para que se cumpla dicho requisito, lo cual indica que el horizonte, la propiedad o el material han alcanzado un alto

grado de expresión para ser medible (criterios cuantitativos) y relevante para la clasificación de suelos (Porta *et al.*, 2003).

Los horizontes y propiedades indican características específicas de la formación de los suelos y sus rasgos pueden ser observados en campo y medibles en el laboratorio; y los materiales influyen significativamente en los procesos pedogenéticos que evolucionan hacia un cierto grado de expresión (IUSS-ISRIC-FAO, 2007).

## **2.7. Importancia de la clasificación de suelos**

En el ámbito de cualquier tipo de clasificación de suelos, la importancia de ésta radica en su utilidad; a partir de la clasificación se organiza el conocimiento en cuanto a las propiedades físicas y químicas de los suelos, facilitando la comprensión de sus relaciones en estudios con propósitos múltiples (Buol *et al.*, 1990). En la clasificación de los suelos se ordenan las propiedades en diferentes niveles jerárquicos (IUSS-ISRIC-FAO, 2007) con propósitos de investigación, estimación de la productividad de los suelos e interpretación de su comportamiento y relación con el entorno. La clasificación representa también un lenguaje universal y la comunicación entre los científicos y usuarios del suelo (IUSS-ISRIC-FAO, 2007).

## **2.8. Sistemas de clasificación de suelos**

Dada la importancia de la clasificación de suelos, es relevante conocer sobre su historia (Hernández, 2004), haciendo referencia a tres de los sistemas más conocidos en el ámbito mundial (Figura 1).

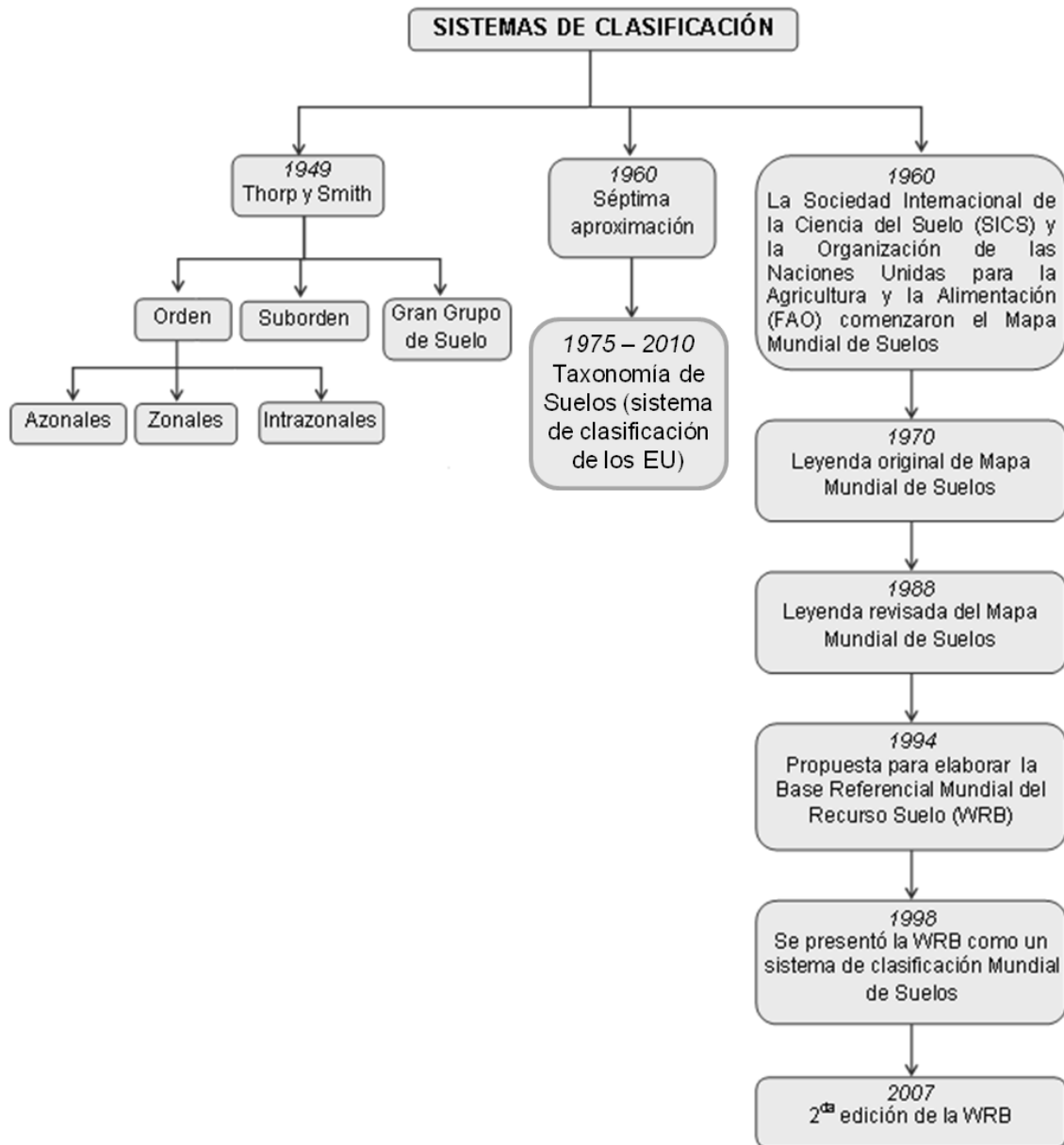


Figura 1. Sistemas de Clasificación de Suelos, tomado de Cortés (2010).

**a). Clasificación Americana propuesta por Thorp y Smith en 1949.** En este sistema se consideran las Categorías Superiores: Orden, Suborden y Gran Grupo de Suelos. En el nivel de Orden se encuentran los suelos Azonales que no presentan características bien desarrolladas porque son suelos recientes localizados en áreas con fuerte inclinación o rocosas y en depósitos aluviales; los Zonales están distribuidos según el clima y la

vegetación, y en los Intrazonales se expresa la influencia dominante del material de origen o de la topografía, localizados en regiones frías, calientes y húmedas, y áridas (Ortiz-Villanueva y Ortiz, 1990).

**b). Séptima Aproximación, 1960.** En éste sistema a un volumen pequeño de suelo conocido como “pedón” se le considera la unidad básica para el estudio del suelo y su magnitud es suficiente para el estudio de horizontes e interrelaciones dentro del perfil de suelo. Se utilizan seis categorías: Orden, Suborden, Gran Grupo, Subgrupo, Familia y Serie de suelos para lo cual se requieren horizontes de diagnóstico, características de diagnóstico y, regímenes hídricos y térmicos (Ortiz-Villanueva y Ortiz, 1990; Hernández y Ascanio, 2004). En 1975 a la Séptima Aproximación se le modificó y con base en ello, se publicó la Soil Taxonomy que es el Sistema Oficial de clasificación en los Estados Unidos, al cual constantemente se ha enriquecido a través de diversas ediciones, la primera en 2003 y la más reciente en 2010 (Soil Survey Staff, 2010).

**c). Leyenda original del Mapa Mundial de Suelos en 1970 y Leyenda revisada del Mapa Mundial de Suelos en 1988.** La Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (SICS) y la FAO en 1960 iniciaron un proyecto para preparar el mapa referencial de suelos del mundo, del cual se generó en 1970 el de la FAO con 26 Unidades de suelo y 106 Subunidades (Hernández, 2004) y en 1988 en la Conferencia Internacional de Clasificación de Suelos, surgió la Leyenda revisada del Mapa Mundial de Suelos, fundamentada en horizontes y características de diagnóstico con 28 Unidades y 153 Subunidades (FAO-UNESCO-ISRIC, 1988).

Posteriormente con el apoyo de la FAO-UNESCO y la SICS se generó una Base de Referencia Internacional para la Clasificación de Suelos (IRB) proponiendo a la WRB

(World Reference Base for Soil Resources) en 1994 con dos niveles de clasificación: Grupo y Unidad, reportándose 30 Grupos de suelos (Hernández, 2004). La WRB fue aceptada hasta 1998 como un Sistema de Clasificación de Suelos con 30 Grupos de Referencia y más de 200 Unidades de suelos (FAO-ISRIC-ISSS, 1998). La segunda edición de la WRB se publicó en 2006 y una primera actualización en 2007 con 32 Grupos de Suelos de Referencia (IUSS-ISRIC-FAO, 2007).

## **2.9. Requerimientos de clasificación de los Andosoles**

### **2.9.1. Leyenda del Mapa de Suelos del Mundo (FAO-UNESCO, 1970)**

De acuerdo con la Leyenda del Mapa de Suelos del Mundo (FAO-UNESCO, 1970) los suelos se clasificaban a nivel de Unidad como Andosoles y los requerimientos eran los siguientes:

Tener un horizonte A mólico o úmbrico o un A ócrico; no presentar otros horizontes de diagnóstico (a menos que estén enterrados por 50 cm o más de material reciente) a una profundidad de 35 cm o más, y presentar una o ambas de las siguientes características:

- a). Una densidad aparente (a 1/3 de bar de retención de agua) menor que  $0.85 \text{ g cm}^{-3}$  en la fracción fina y un complejo de intercambio dominado por material amorfo;
- b). 60% o más de ceniza volcánica vítrea.

La clasificación de Andosoles reportada en las Cartas Edafológicas publicadas por CETENAL actualmente el INEGI se basó en los requerimientos que anteceden, de los cuales sólo la densidad aparente se da a conocer y no necesariamente a 1/3 de bar de retención de agua como lo requiere la metodología.

### **2.9.2. WRB: Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS-ISRIC-FAO, 2007)**

Con la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS-ISRIC-FAO, 2007) se clasifica a nivel de Grupo como Andosol a aquellos suelos que tienen propiedades ándicas o vítricas en un espesor combinado de ya sea:

a). 30 cm o más dentro de los primeros 100 de la superficie del suelo y comienzan en los 25 cm superficiales del suelo; o

b). 60% o más del espesor completo del suelo cuando la roca o un material endurecido comienza entre los 25 y 50 cm superficiales.

#### **Propiedades ándicas**

Las propiedades ándicas resultan de la meteorización moderada de materiales volcánicos en donde su mineralogía está dominada por minerales amorfos. Estas propiedades deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Un valor de  $\%(Al + \frac{1}{2}Fe)$  de 2% o más; **y**
- Densidad aparente de  $0.9 \text{ g cm}^{-3}$  ó menos; **y**
- Retención de fosfato de 85% ó más; **y**
- Menos de 25% de carbono orgánico.

#### **Propiedades vítricas**

Las propiedades vítricas corresponden a materiales dominados por vidrio volcánico y otros minerales primarios que se derivan de eyecciones volcánicas. Deben cumplir con los siguientes requisitos:

- 5% o más de vidrio volcánico, agregados vítreos u otros minerales primarios revestidos con vidrio, en la fracción entre 0.05 y 2 mm, o en la fracción entre 0.02 y 0.25 mm; **y**
- Un valor de  $\%(Al + \frac{1}{2}Fe)$  mayor que 0.4%, **y**
- Retención de fosfato mayor que 25%, **y**
- No cumple con uno o más criterios de las propiedades ándicas; **y**
- Requiere menos del 25% de carbono orgánico.

## **2.10. Propiedades edáficas**

### **2.10.1. Estructura**

Se refiere a disposición y ordenamiento que adoptan las partículas elementales entre sí para formar agregados. La estructura influye en la porosidad, por lo tanto, en la aireación, pero también en la erosión y lavado de los suelos. Para que pueda darse una estructura en el suelo es imprescindible un cierto nivel en el contenido de arcilla. La arcilla favorece la cohesión en estado húmedo y la fragmentación cuando se seca. La estabilidad de la estructura depende tanto de factores propios del suelo como de otros externos al mismo. Entre los primeros están la calidad de los cementantes (por ejemplo, la materia orgánica) presentes en el suelo y causantes de la agregación, mientras que entre los externos el más importante es el clima (Rozas, 2010).

### **2.10.2. Textura**

Se define como la naturaleza y distribución de los elementos que forman los materiales constitutivos del suelo después de destruidos los agregados (Rozas, 2010). De acuerdo con la distribución del tamaño de partículas, se forman suelos de textura gruesa, media y fina, en los primeros dominan las arenas, partículas que varían de 2.00 a 0.05 mm de

diámetro ( $\Phi$ ), en los segundos, partículas de limo menor de 0.05 a 0.002 mm  $\Phi$  y en los últimos, partículas de arcilla, menores de 0.002 mm  $\Phi$ . El tamaño de las partículas del suelo antes mencionado, afecta a varias propiedades de los suelos, entre ellos, a la estructura, consistencia, porosidad, aireación y movimiento del agua. De manera particular, dicha distribución condiciona la “agregabilidad” o facilidad de unión de las partículas, por ejemplo, los suelos arenosos tienen muy poca agregación en comparación con los arcillosos en donde la agregación es alta (Montenegro, 1991).

Las arcillas, especialmente las expandibles tienen un alto potencial iónico y dan respuesta a la resistencia de los agregados, debido a las fuerzas cohesivas que provienen de sus enlaces químicos (Narro, 1994). En cambio, los suelos ricos en partículas del tamaño limo, característico de los suelos conocidos como Andosoles, al presentar un potencial iónico reducido, la agregación es desfavorable y difícil de lograr estabilidad estructural (Montenegro, 1991; Narro, 1994; Porta *et al.*, 2003).

### **2.10.3. Materia orgánica**

El humus como producto de la transformación de la MO, al descomponerse por acción de los macro y microorganismos del suelo, junto con las secreciones de los organismos vivientes, constituyen los principales agentes cementantes que participan en la formación, estabilidad y conservación de los agregados del suelo, dándole porosidad para el movimiento de agua y aire (Porta *et al.*, 2003; Montenegro, 1991). Sin embargo, una vez que los agregados están expuestos al agua, éstos se desestabilizan (Tisdall y Oades, 1982). Se ha encontrado una alta correlación entre la MO y la agregación del suelo (Hermawan y Bomke, 1997).

#### **2.10.4. Constituyentes amorfos**

El término amorfo o arcillas de corto alcance (amorfo = sin forma), se refiere a sólidos que no tienen estructura cristalina, como es el caso del vidrio, cuya estructura no presenta un orden repetitivo a largas distancias de los átomos de mínimo 3 nm de diámetro. Estos componentes están arreglados al azar, por el contrario, un sólido cristalino se define como un sólido que consiste de la repetición periódica de átomos, iones o moléculas juntas en tres dimensiones que no están en el mismo plano (Hidalgo, 2004).

Dichos componentes al encontrarse entre la transición de la roca madre y de los minerales secundarios cristalinos, pueden considerarse como trazadores de la evolución, es decir, son fases de aluminosilicatos transitorios en los procesos de intemperismo del suelo. Los amorfos como alófano, imogolita, ferrihidrita (Parfitt y Clayden, 1991) y complejos amorfos órgano-minerales de Al-Fe-humus se presentan con frecuencia en los suelos derivados de cenizas volcánicas (Andosoles) a los cuales también se les atribuye la estabilidad de los agregados (Barreal *et al.*, 2001; Schwertmann y Taylor, 1989). En estos suelos, existen fuerzas que ligan a sus partículas elementales como son la unión de Arcilla-alófano-materia orgánica (Calderón, 1996; Tisdall y Oades, 1982).

En los suelos alofánicos ricos en MO, los complejos órgano-minerales, son los que participan en la formación de la microestructura del suelo (Schwertmann, 1966). Los Andosoles se caracterizan por tener una macroestructura frágil tanto en estado seco como en húmedo, sin embargo, la FAO-ISRIC-ISSS (1994) indica que en estos suelos, los microagregados son más estables y se asocian a los minerales amorfos antes indicados (Parfitt, 1980; Wada, 1980; Soil Survey Staff, 1999).

- **Alófano.** Es el nombre dado a una serie de aluminosilicatos hidratados altamente desordenados no cristalinos o amorfos a los rayos X que presentan una composición química diversa (van Olphen, 1971, citado por Shoji *et al.*, 1993), estos consisten en esferas huecas con diámetros de 3.5 a 5 nm. Harsh *et al.*, 2002, los definió como: un grupo de minerales arcillosos con un orden de rango corto, que contiene una combinación química de sílice, alumina y agua. Los suelos con alófano pueden retener una gran cantidad de agua de 80% a 180% (Porta *et al.*, 1999).

- **Imogolita.** La presencia de la imogolita se relaciona con la del alófano por tener una composición química similar (Farmer *et al.*, 1980). El alófano y la imogolita son producto del intemperismo *in situ* de aluminosilicatos primarios, principalmente el vidrio volcánico. Por un proceso de hidrólisis el vidrio se intemperiza liberando Si y Al, elementos que precipitan (Cortes y Franzmeier, 1972) y forman alófano e imogolita; éste proceso se conoce como Andisolización (Wada, 1985; Soil Survey Staff, 1999). Los factores que favorecen la formación de alófano e imogolita pueden ser de dos maneras: a) un buen drenaje, Al activo disponible a partir de vidrio rico en bases (Shoji *et al.*, 1982), pH de neutro a escasamente ácido (5 a 7) y un ambiente cálido y húmedo (FAO-ISRIC-ISSS, 1998) o b) a partir de feldespatos, un pH aproximado a 5, humedad y buen drenaje (Parfitt y Kimble, 1989).

- **Ferrihidrita.** Este amorfo de óxido de hierro es dominante en la mayoría de los suelos volcánicos y algunas de las propiedades del alófano pueden ser atribuidas a éste. Se considera que su presencia en el suelo influye en la estructura y estabilidad de los agregados (Schwertmann y Taylor, 1989).

### 2.10.5. Arcillas

En el ámbito de la geología, los minerales de arcilla son el producto de la degradación, ya sea por meteorización o por procesos hidrotermales, de otros silicatos o vidrios silicatados (Whitten y Brooks, 1980). Desde el punto de vista edafológico, las arcillas son aquellas partículas cuya medida de diámetro es menor a 0.002 mm (2  $\mu\text{m}$ ), estas partículas tiene un comportamiento coloidal, es decir, las fuerzas de carácter eléctrico son las que predominan en sus uniones, más que las fuerzas gravitacionales, otra propiedad que las caracteriza es su capacidad de adsorber y perder agua (Porta *et al.*, 2003).

En el caso de la formación de arcillas silicatadas en Andosoles, éstas son incipientes y en algunos casos moderada por tratarse de suelos relativamente jóvenes (FAO-ISRIC-ISSS, 1994); no obstante, en aquéllos suelos en donde se han formado arcillas, éstas son halosita y caolinita principalmente (Porta *et al.*, 1999).

### 2.10.6. Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg o también llamados límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo de sus propiedades y la cantidad de agua que contengan. Un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico y líquido o viscoso. A contenidos bajos de humedad, el suelo se comporta como un sólido, pero con aumentos en humedad, se vuelve plástico y puede deformarse. El punto de cambio en el comportamiento del suelo de sólido a plástico se denomina *límite plástico*. A mayor contenido de humedad, el suelo alcanzará el *límite líquido* y fluirá bajo su propio peso. El *índice de plasticidad*, indica el grado de plasticidad del suelo. Atterberg demostró que la plasticidad de una arcilla puede describirse mediante dos parámetros el *límite líquido* y el *límite plástico*. Por ejemplo, en

arcillas inorgánicas que no sean de origen volcánico es poco frecuente un límite líquido mayor de 100, sin embargo, en arcillas volcánicas son frecuentes valores sobre este número, mientras que en arcillas ordinarias de alta plasticidad es de alrededor de 30% (Juárez, 2012).

Se sabe que el porcentaje y tipo de arcilla en proporción con el total de los minerales influye de manera considerable en el comportamiento de los suelos y una forma de analizar dicho comportamiento es mediante el límite de plasticidad, esto indica que, entre más plástico sea el material mayor será su potencial de expansión y menor su resistencia (Mitchell, 1976).

#### **2.10.7. Estabilidad de agregados**

La estabilidad de agregados es un índice que se relaciona con la capacidad del suelo para mantener su disposición estructural frente a fuerzas exógenas como son los factores naturales y antrópicos que producen que el suelo se encuentre expuesto a una dinámica de agregación y desagregación. La ausencia de remoción del suelo y la presencia de raíces vivas contribuyen como factores de estabilidad, ante la falta de cambios en el componente orgánico edáfico (Álvarez *et al.*, 2012).

La MO tiene una profunda influencia sobre las propiedades del suelo ante fuerzas desestabilizadoras como el humedecimiento. A través de la formación de enlaces con la superficie reactiva de las partículas minerales, la MO es capaz de unir partículas individuales de suelo formando agregados estables al agua en un rango que puede ir desde  $< 2 \mu\text{m}$ , hasta elementos tales como raíces de plantas e hifas de hongos (Baldock y

Nelson, 1999). Existe una alta asociación entre el tamaño de los agregados estables al agua (entre 4 y 2 mm y < 0.25 mm) y la MO (Pulido-Moncada *et al.*, 2009).

La capacidad de humectación del suelo es una propiedad que influye en la estabilidad de los agregados (Ellies *et al.*, 1996), se relaciona con la MO y puede verse afectada por la forma en que ésta última se encuentra distribuida en los agregados. El nivel de humectación del suelo varía en función de las condiciones climáticas, tipo de suelo y manejo, por ejemplo, en suelos forestales, la humedad es mayor durante el otoño e invierno y disminuye en primavera-verano. Los resultados preliminares de Ramírez y Gallardo (2012) indican que la tasa de degradación de la MO es menor en la época invernal, por lo que, la estabilidad de los agregados se ve afectada si la MO tarda en incorporarse al suelo.

La estabilidad de los agregados está relacionada con las asociaciones órgano-minerales y agentes de enlace (Jastrow y Miller, 1998; Oades, 1984), y también depende de la fuerza con que las arcillas son absorbidas por la MO y residuos microbianos (Jastrow y Miller, 1998). La disminución de agentes de enlace de origen orgánico contribuye con la pérdida de estabilidad de los macroagregados y permite la ruptura de estos por humedecimiento, y se incrementa el contenido de microagregados (Tisdall y Oades, 1982).

Knoblich *et al.* (1996) señalan que uno de los factores que influyen en la destrucción de los agregados son las altas precipitaciones al provocar la saturación de las capas superiores del suelo. Cuando los poros dentro de los agregados están saturados, la adición de más agua ingresa entre los poros de los diferentes microagregados, así la falta

de fuerza y la desintegración de los agregados menos estables producen la reducción de la resistencia.

La estabilidad de agregados en húmedo es determinada con base en el principio de que los agregados inestables se romperán con mayor facilidad que los estables cuando son sumergidos en agua o cuando son sometidos al impacto de las gotas de lluvia (Lobo y Pulido, 2006). El método más utilizado para evaluar la estabilidad estructural de los suelos es el tamizado en húmedo propuesto por Yoder (1936), donde se determinan los agregados estables al agua en movimientos ascendentes y descendentes con un agitador mecánico, utilizando un juego de tamices con aperturas de malla de 6.3 mm, 4.0 mm, 2.0 mm, 1.0 mm, 0.5 mm y 0.25 mm. Cabe señalar que dicho método ha sido modificado y ajustado por varios autores de acuerdo con los propósitos de su investigación (Lobo y Pulido, 2006).

### **3. ANTECEDENTES**

#### **3.1. Clasificación de suelos en México**

En los siguientes párrafos se abordan antecedentes en donde clasifican a los suelos con diferentes sistemas: Leyendas original y revisada del Mapa Mundial de Suelos (FAO-UNESCO, 1970 y FAO-UNESCO-ISRIC, 1988), respectivamente y a la WRB: Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (FAO-UNESCO-ISRIC, 1998 y FAO-ISRIC-SICS, 2007). Algunos autores tomaron como referencia los suelos publicados por DETENAL (1979) actualmente INEGI (1982-1984).

Para la zona del volcán Popocatepetl, Vallejo y Aguilera (1969) reportaron Cryandepts Ochricos y Dystrandeps Ochricos (Séptima aproximación, 1960) en altitudes de 1750 a 3000 m. Estos suelos presentan materiales secundarios como el alofano, halloysita y en algunos se muestra material arcilloso de tipo caolinita y montmorillonita.

Rodríguez (1999) clasificó a un *Andosol háplico* en una zona del estado de México, determinó sus procesos de intemperismo y pedogenéticos involucrados en su formación. Lo clasificó para evaluar su influencia sobre los suelos actuales con la FAO-UNESCO-ISRIC versión 1988.

### **3.1.1. Clasificación de suelos en Michoacán**

Los primeros trabajos sobre clasificación de suelos se registran para la región de la Meseta Tarasca, Michoacán.

Los suelos de Ando se reportan por Aguilera (1963) y Aguilera (1965) como suelos de origen volcánico ricos en ceniza vítrea y se caracterizan por contener materia orgánica entre 5% y 20% en los primeros 30 cm de espesor, nitrógeno entre 0.2 y 0.7%, pH de 4 a 6.5 y una capacidad de intercambio catiónico de 15 a 60  $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$  de suelo. Estos suelos se originaron de cenizas volcánicas y material andesítico (Cervantes, 1965).

De acuerdo con Alcalá *et al.* (2001) para la región de la Meseta Tarasca, en las cartas edafológicas del INEGI se registran 13 Andosoles que a nivel de subunidad, la mayoría son húmicos y, los demás ócricos y vítricos. Una vez que a estos suelos se reclasificaron con la Leyenda original del Mapa Mundial de Suelos (1970), cuatro resultaron Andosoles ócricos y, los demás Fluvisoles y Regosoles dístricos. Con la Soil Taxonomy (1999) se

clasificó a un Entisol y a 13 Andisols, los cuales se subdividieron en Vitrandis y Udands que a nivel de Subgrupo presentaron características diferentes importantes para su manejo. Con la WRB (1998) a nivel de Grupo fueron dos Fluvisoles, de unidad, dístico y arénico, y 12 Andosoles vítricos.

Para la Microcuenca de Atécuaro, el INEGI (1982) reporta en orden de abundancia las siguientes unidades y subunidades de Andosol húmico y constituyendo un segundo grupo de suelos secundarios: Andosol ócrico (To). Los Andosoles presentan una textura media (limo) y los Acrisoles, fina (arcilla), aunque existen pequeñas porciones de estos suelos con textura media.

En el Municipio de Morelia, Michoacán con base en la Leyenda revisada del Mapa Mundial de suelos (1988) se reportan Andosoles háplico y úmbrico en la microcuenca del Río Chiquito (Calzada, 1992); Andosol mólico en el Cerro de Quinceo en la Microcuenca de Chiquimitio (Gudiño, 1992); Andosol en Capula (Saldaña, 1995); y un mapa de Andosoles para la Microcuenca de Atécuaro, sin especificar el sistema de clasificación utilizado (García, 1999).

En relación con los Andosoles, Alcalá (2003) hace notar que los Andosoles clasificados en los trabajos que anteceden, tanto en el ámbito nacional como en el local, éstos presentan una caracterización general e insuficiente para determinar desde los horizontes de diagnóstico hasta las propiedades ándicas que contienen propiedades físicas, químicas y minerales, información que en los trabajos citados no se reporta, como es el caso de la retención de fósforo, porcentajes de Al y Fe, y vidrio volcánico. Por esta razón,

la falta de datos pone en duda si los suelos son Andosoles o sólo presentan propiedades ándicas o vítricas.

En la cuenca de Umécuaro se clasificaron 11 suelos por Ramos (2008) de acuerdo con las Leyendas original y revisada del Mapa Mundial de suelos versiones 1970 y 1988, respectivamente y con la WRB 1998. Con las tres versiones, cuatro suelos resultaron Acrisoles, cinco Cambisoles con la Leyenda original mientras que con la Leyenda revisada fueron Andosoles y Cambisoles. La autora señala que las diferencias en los nombres se deben a los constantes cambios de nomenclatura de los sistemas.

Para la microcuenca de Atécuaro, Mpio. de Morelia, Mich. se reporta un suelo por Cortés (2010) clasificado con varios sistemas de clasificación: Andosol háplico (ANh) con la Leyenda revisada del Mapa Mundial de Suelos (FAO-UNESCO-ISRIC, 1988); Andosol vítrico-hiperdístrico (AN vi-dyh) con la WRB (FAO-UNESCO-ISRIC, 1998) y un Andosol silándico hiperdístrico límico, ANsn (hd, sl) con la WRB (FAO-ISRIC-SICS, 2007). El suelo se localiza en una loma constituida por basalto-andesítico y puede ser considerado como un testigo o relicto del material que predominaba en la microcuenca (ceniza volcánica) y que ha desaparecido gradualmente a consecuencia de los procesos erosivos. Para la zona de Atécuaro, menciona que es común encontrar este suelo en zonas de mayor altitud en donde se conserva el bosque.

### **3.2. Estabilidad de agregados**

Según los estudios realizados por Boix-Fayos *et al.* (2001) sobre la agregación del suelo y su relación con la textura y la materia orgánica (MO), encontraron que los agregados de zonas subhúmedas con tamaño de 1.0 mm a 0.105 mm presentaron una correlación

positiva con el contenido de arena muy fina (100-50  $\mu\text{m}$ ), arcilla (< 2  $\mu\text{m}$ ) y con la MO. La estabilidad de los microagregados < 0.105 mm en agua tuvo una correlación positiva con las arcillas (29%) mientras que la de los macroagregados dependió de contenidos de MO mayor al 5%.

Chaney y Swift (1984) determinaron la estabilidad de agregados en suelos agrícolas mediante el método de tamizado en húmedo y la relacionaron con propiedades edáficas, entre ellos la textura y MO. Los resultados con la MO (1.0% y 9.5%) mostraron una correlación directa, es decir conforme la MO aumentó los agregados fueron más estables.

Tisdall y Oades (1982) encontraron que la estabilidad de los agregados en agua depende en gran medida de materiales orgánicos, por ejemplo, en suelos con rotación de cultivos y alto contenido de carbono orgánico (> 2%), se presentan macroagregados con un diámetro mayor a 2500  $\mu\text{m}$  unidos por raíces e hifas que los estabilizan. Los agregados de 20 a 250  $\mu\text{m}$  se forman por partículas de 2 a 20  $\mu\text{m}$  unidas por MO, óxidos cristalinos y aluminosilicatos amorfos. Finalmente, los microagregados de 2 a 20  $\mu\text{m}$  consisten de partículas menores a 2  $\mu\text{m}$  fuertemente unidas por enlaces orgánicos asociados a células bacterianas.

De acuerdo con Calderón (1996), un suelo virgen rico en MO alcanza una estabilidad de agregados del 100%, en cambio, suelos cultivados sin aporte de materia orgánica pueden presentar estabilidades del 20 al 30% y señala que para que un suelo no tenga problemas de estructura, se requiere que su estabilidad sea superior al 80%. Sin embargo, en suelos de origen volcánico (Andosoles) Meza y Geissert (2003) mencionan que estos suelos han sido poco estudiados en cuanto a su transformación de cambio de uso forestal a agrícola,

los cuales presentan características físicas que favorecen una buena estabilidad estructural hasta de 80% en horizontes forestales y 62% en cultivados, y resaltan que esta diferencia también se manifiesta en la distribución de los agregados por tamaño. El diámetro medio ponderado de los agregados es de 1.2 mm en bosque y 0.9 mm en cultivo, lo que confirma que al cultivar el suelo disminuye la estabilidad estructural, esto de acuerdo con la clasificación de estabilidad de agregados propuesta por Le Bissonnais y Le Souder (1995).

Para autores como Soriano *et al.* (1996), la estabilidad de los agregados del suelo varía en función de la altitud y de la orientación de las laderas. Los autores correlacionaron la estabilidad de los macroagregados con la humedad, la MO y arcilla, parámetros que a su vez se relacionaron con el gradiente altitudinal. Los resultados mostraron que los suelos son poco desarrollados (Leptosoles líticos) y obtuvieron una correlación positiva ( $R^2 = 0.810$ ) al combinar las humedad, arcilla, MO y estabilidad de macroagregados (10-5 mm). Los mayores porcentajes de microagregados estables en agua fueron para las laderas de la zona intermedia, mostrando una relación con el aumento de arcilla en el suelo y la mayor variabilidad la obtuvieron en las exposiciones hacia el norte donde aumentó la heterogeneidad de las muestras.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

Al Oriente del estado de Michoacán, existen suelos de origen volcánico reportados por el INEGI (1982) como Andosoles que por su naturaleza, ubicación topográfica (laderas de cerro muy inclinadas) y cambio de uso del suelo, son susceptibles de perderse de manera paulatina o drástica por deslizamientos ante eventos hidrometeorológicos. Estos suelos cuando se les desprotege de su cobertura de vegetación son muy susceptibles de perder su estructura y están sujetos a efectos de erosión acelerada. Se considera que éste proceso fue en gran parte la causa que pudo haber detonado el deslave que ocurrió en febrero de 2010 en las poblaciones de Angangueo, Ocampo y Zitácuaro, Mich. En diversas laderas de esta región gran parte del suelo se deslizó destruyendo caminos y casas.

Con el objeto de definir cuáles de las propiedades de los suelos podrían haber influido en los procesos de deslizamientos y flujos de detritos, se caracterizó física y químicamente el suelo de cinco laderas de cerros asociados con deslizamientos.

Dado que las Cartas Edafológicas del INEGI, muestran que la información disponible para clasificar los suelos donde se localizan las zonas de deslizamiento, han sido generadas a una escala muy regional, fue necesario también precisar la clasificación de los suelos en relación con la Base Referencial Mundial de Recurso Suelo.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Clasificar los suelos de cinco laderas localizadas al Oriente de Michoacán y definir la estabilidad de los agregados de los suelos como posible indicador en la precipitación de los deslizamientos de masa.

### **5.2. Específicos**

- Clasificar a los suelos del Oriente de Michoacán con la Base Referencial Mundial de Recurso Suelo más reciente.
- Determinar las Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los suelos.
- Determinar la estabilidad de los agregados de los suelos

## **6. HIPÓTESIS**

- No todos los suelos de las cinco laderas de estudio son Andosoles como lo ha reportado el INEGI.
- El deslizamiento del suelo se explica por una baja estabilidad de los agregados, además de intervenir otras propiedades físicas y químicas del suelo.

## 7. DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

### 7.1. Localización Geográfica

El área de estudio se localiza al oriente de Michoacán y occidente del estado de México (Figura 2) en las coordenadas 19°37" de latitud norte y en los 100°17" de longitud oeste, en altitudes promedias de 2580 m. El municipio Mineral de Angangueo limita al norte con Senguio, al este con el estado de México, al sur con Ocampo (éste al sur con Zitácuaro) y al oeste con Áporo. Su distancia a la ciudad de Morelia es aproximadamente de 170 km.

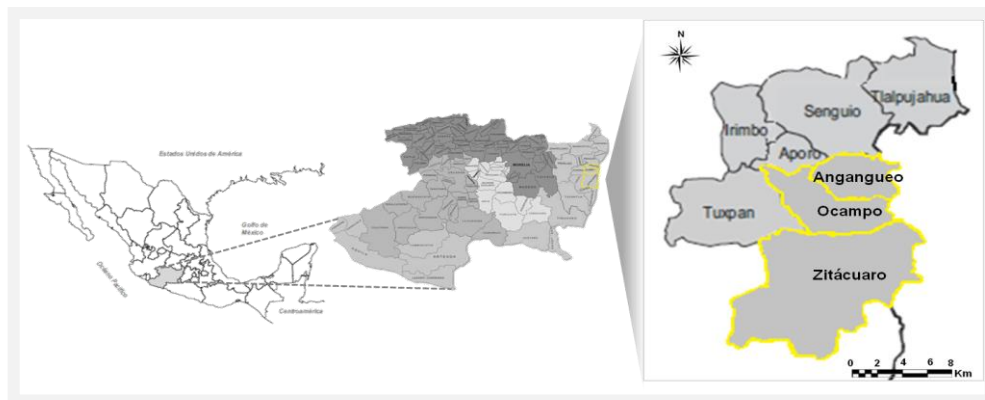


Figura 2. Mapa de ubicación de los municipios en donde se estudiaron los suelos del Oriente de Michoacán

### 7.2. Fisiografía

La sierra de Angangueo (SA) pertenece al Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), este se extiende sobre la latitud 20° y atraviesa el centro de México, desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México, constituyendo así uno de los mayores elementos de la geología del país (Demant y Robin, 1975; Pasquare *et al.*, 1991) (Figura 3). La SA conforma un conjunto montañoso entre los que destacan las sierras Chincua, Rancho Grande y El Campanario, todos ellos de origen volcánico y con edades que van del Oligoceno, Mioceno al Cuaternario, compuesta principalmente por materiales andesíticos y basálticos.

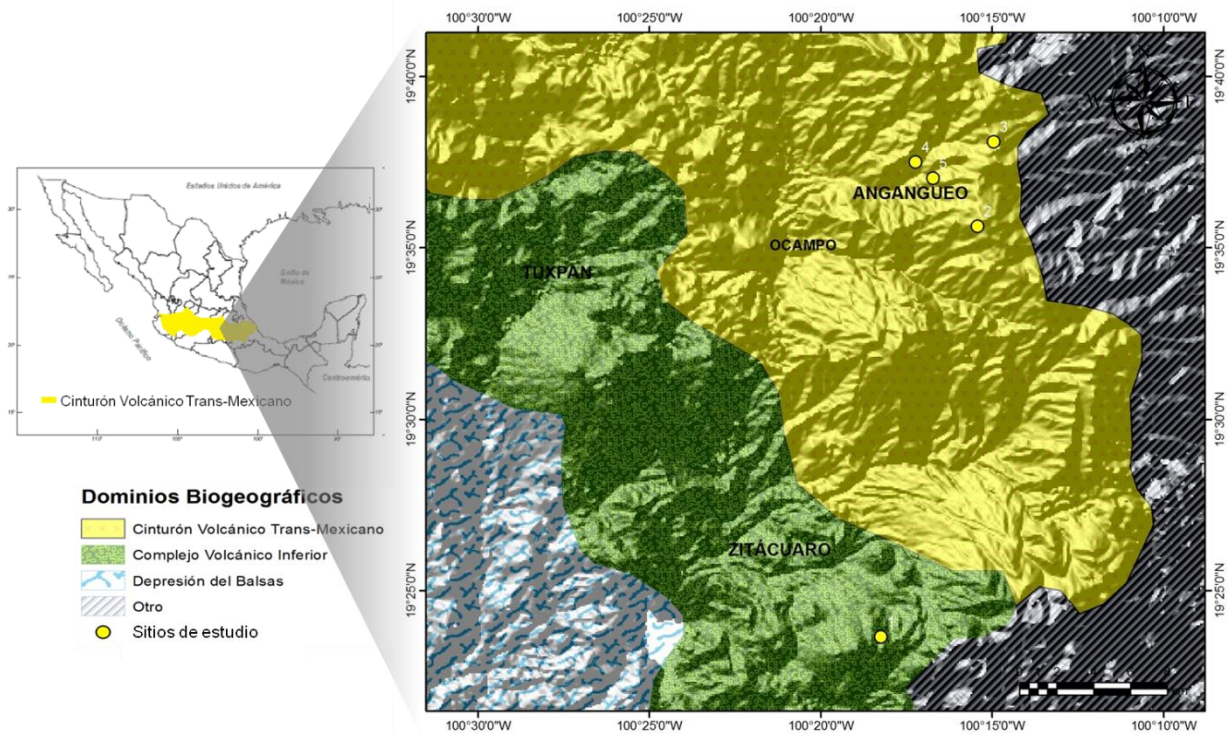


Figura 3. Localización del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano y ubicación de los sitios de muestreo en el Oriente de Michoacán. Extracto del Atlas Geográfico del Estado de Michoacán (Correa-Pérez, 2003).

### 7.3. Geología.

Regionalmente la zona de estudio presenta una columna litológica que comprende una secuencia metamórfica de facies de esquistos verdes del Jurásico. Estas rocas son las que forman las unidades encajonantes de la mina de Angangueo, sobre de ellos se observan en las afueras de Angangueo unidades de capas rojas que descansan en forma discordante sobre las rocas metamórficas (Pasquare *et al.* 1991).

De acuerdo con Demant (1982), el vulcanismo de la zona forma parte de la provincia oriental del estado de Michoacán, la cual se caracteriza por vulcanismo andesítico-basáltico del Mioceno-Plioceno, cubierto por una provincia de domos riolíticos y dacíticos, acompañados de flujos piroclásticos; estos domos son contemporáneos con el vulcanismo

monogenético del campo Michoacán-Guanajuato, donde existen seis volcanes por cada 100 km<sup>2</sup>. A esta fase corresponden también depósitos fluviales y lacustres, distribuidos al pie de las vertientes de la sierra. En el mapa geológico del sector central del CVTM de los estados de Michoacán y Guanajuato generado por Pasquarè *et al.* (1991), se muestra una descripción de las unidades presentes en Angangueo compuestas de flujos de lava andesíticos y basálticos del Mioceno medio. La unidad geología que aflora en la Sierra de Angangueo ha sido el resultado de emisiones pliocénicas y cuaternarias. A las primeras corresponden importantes acumulaciones andesíticas que formaron un alto número de edificios volcánicos de gran tamaño (vulcanismo poligenético), en donde se presentaron escasas emisiones de piroclastos. (Figura 4).

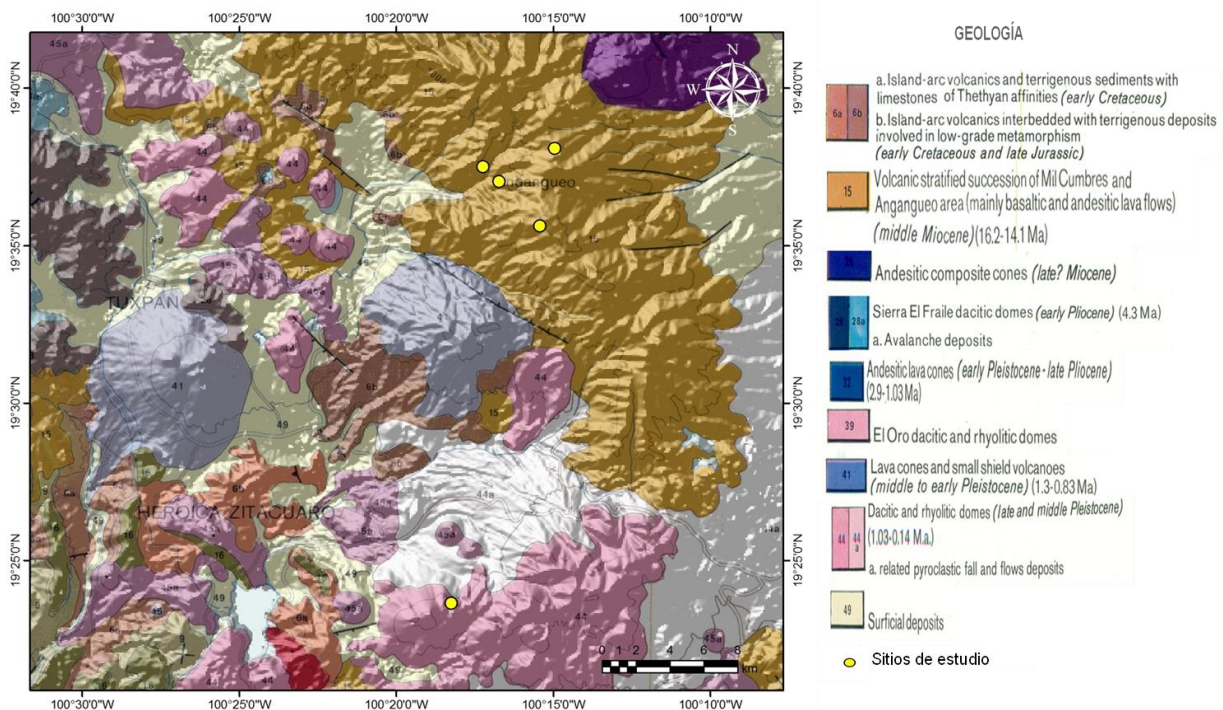


Figura 4. Extracto del mapa geológico del sector central del CVTM, escala 1:300 000 realizado por Pasquarè *et al.* (1991) y ubicación de los sitios de muestreo.

#### 7.4. Litología

En la zona en estudio, el INEGI (2000) reporta que se encuentran rocas volcánicas de distinto grado de acidez.

- *Rocas volcánicas básicas*: las principales son *basaltos pliocénicos y cuaternarios*. Presentan un color pardo, negro o gris oscuro que se altera a tonalidades rojizas. Generalmente muestran una estructura vesicular y en ocasiones contienen cristales de plagioclasa y olivino. Es común encontrar unidades de *brecha volcánica y tobas básicas* compuestas por fragmentos de lapilli, éstas tienen una coloración de gris oscuro a rojo, que cuando tienen un alto grado de meteorización cambia a pardo.

- *Rocas volcánicas intermedias*: Son las rocas predominantes en la Sierra de Angangueo, donde destacan las *andesitas*, éstas son de color gris oscuro que al meteorizarse cambian a pardo rojizo, están compuestas por cristales, minerales y vidrio volcánico; son rocas terciarias, anteriores a los basaltos en la secuencia volcánica y se presentan formando la estructura de las sierras Chincua, Campanario y Rancho Grande.

- *Rocas volcánicas ácidas*: Por encima de las rocas metamórficas y de las andesitas pliocénicas se encuentran las *dacitas*. Estas rocas ácidas que presentan un color gris, variando de claro a oscuro. Estos aparatos son visibles en la región de Zirahuato y de Ocurio, donde diferentes domos dacíticos configuran la morfología de la zona, destacando el Cerro Zirahuato con depósitos de avalanchas y flujos piroclásticos de tipo dacítico.

### 7.5. Clima

Los sitios estudiados se caracterizan por presentar temperaturas frescas. En base a la clasificación de Koppen modificada por García (1988), el clima de la región es del tipo C(E)(w0)(w) y C(m)(w), es decir, semifrío subhúmedo y templado húmedo con abundantes lluvias en verano (Figura 5). Sin embargo, el ámbito altitudinal del área permite la existencia de tres zonas mesoclimáticas predominantes como lo son fresca-subhúmeda, semifrías-subhúmeda y fría-subhúmeda. La temperatura más cálida por mes, es cercana a los 22 °C, con baja oscilación térmica, entre 5 y 7 °C. En invierno la temperatura media de las partes bajas no alcanza los 12 °C, mientras que en las cumbres son menores a 6 °C, el mes más frío es enero en el cual, la temperatura mínima oscila entre 0 y 3°C.

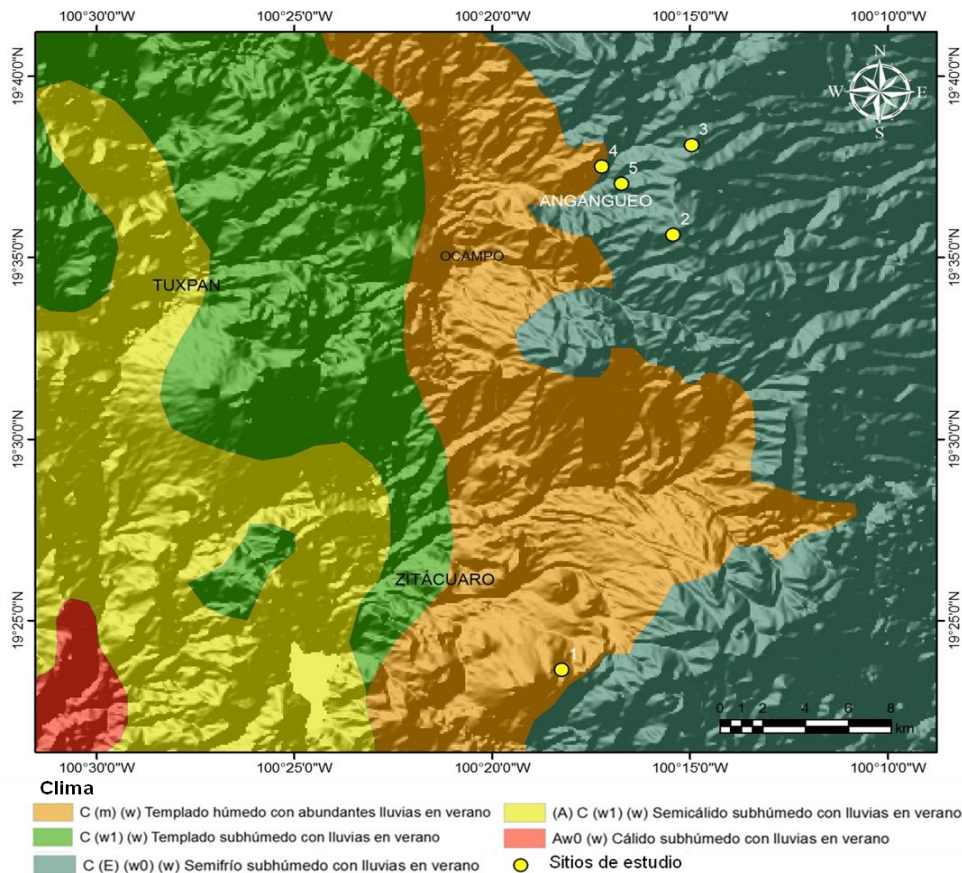


Figura 5. Mapa de clima para el área de estudio. Extracto del Atlas Geográfico del Estado de Michoacán (Correa-Pérez, 2003).

La precipitación es el elemento climático que más influye en la conformación del paisaje, las estaciones climáticas reportan una precipitación media anual que oscila entre 1000 y 1400 mm (Figura 6) (Correa-Pérez, 2003). Para el área de estudio en el presente trabajo, donde los suelos fueron afectados por deslizamientos ocurridos en los primeros cinco días de febrero de 2010, Figueroa (2013) realizó un análisis de las lluvias atípicas que se presentaron, con base en el pluviógrafo de Chincua por ser la estación que registró el horario completo de dicho fenómeno meteorológico, donde reporta que la cantidad de lluvia caída en esos días fue de 358 mm, casi la mitad de la precipitación media anual.

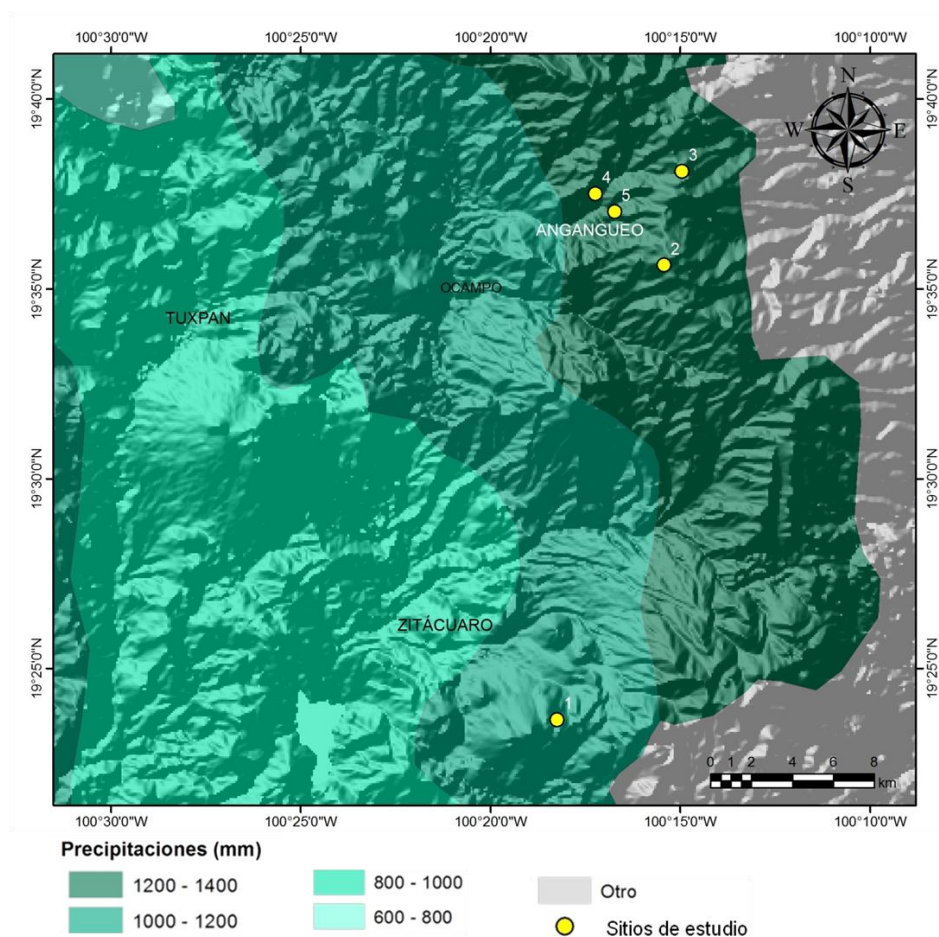


Figura 6. Mapa de precipitación media anual para el área de estudio. Extracto del Atlas Geográfico del Estado de Michoacán (Correa-Pérez, 2003).

### 7.6 Suelos

En general, el estado de Michoacán presenta una gran diversidad de tipos de suelos como resultado de su accidentada topografía y variedad de climas. De acuerdo con Correa-Pérez (2003) quien tomó como referencia el sistema de clasificación FAO-UNESCO y el Plano de Suelos de Estado de Michoacán editado por INEGI (1985). Para la zona de estudio correspondiente a los municipios Mineral de Angangueo, Ocampo y Zitácuaro, el tipo de suelo dominante es el Andosol, seguido del Acrisol, Leptosol y Vertisol en menor proporción (Figura 7).

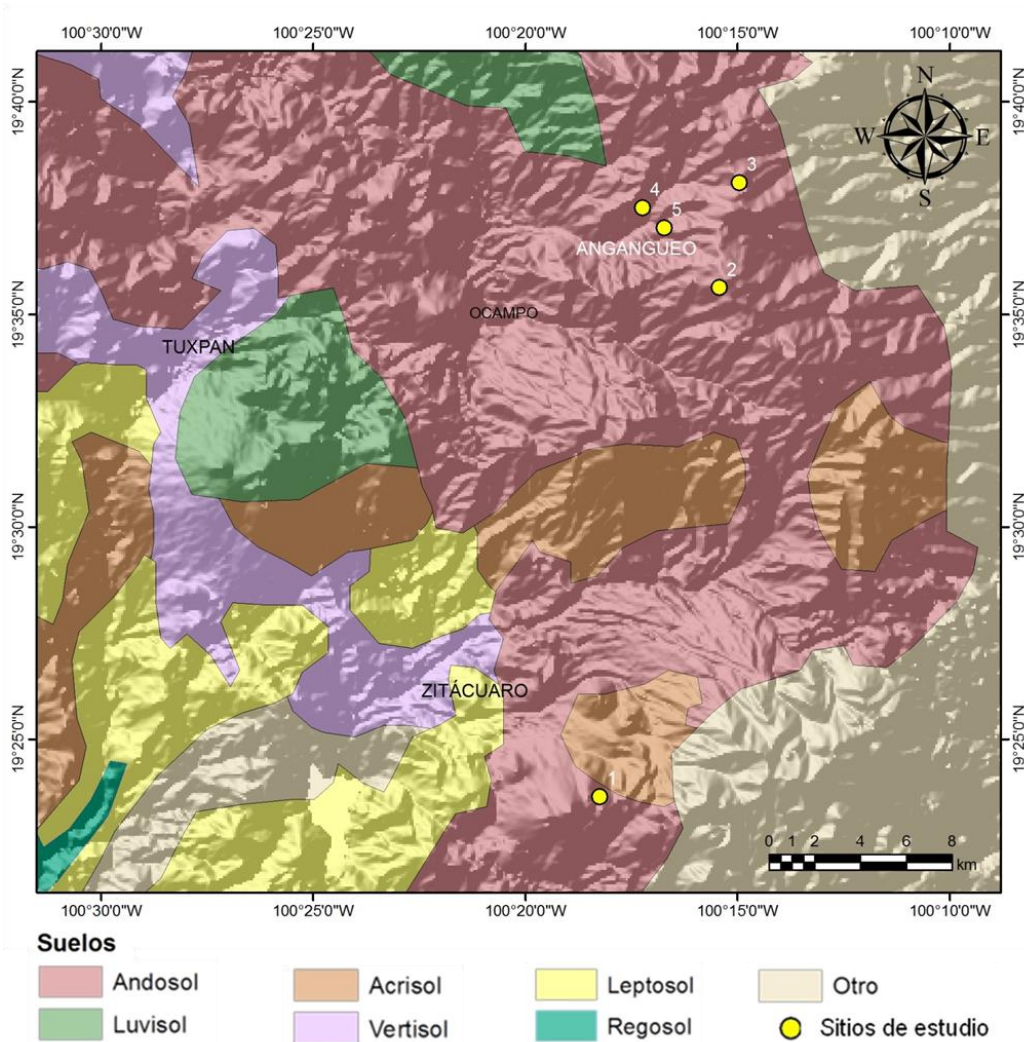


Figura 7. Unidades de suelo de los sitios de estudio en el Oriente de Michoacán. Extracto del Atlas Geográfico del Estado de Michoacán (Correa-Pérez, 2003).

**Andosol** (del japonés: *an* = oscuro y *do* = tierra). Son suelos de origen volcánico, constituidos principalmente de ceniza las cuales se caracterizan por la presencia de minerales amorfos con altos contenidos de alófono que le dan ligereza y untuosidad al suelo (INEGI, 2008). Se pueden encontrar en una gran variedad de climas pero son comunes en ambientes húmedos y fríos (Parfitt, 1990). En general son de colores oscuros, tienen alta capacidad de retención de humedad y valores altos de porosidad. En condiciones naturales presentan vegetación boscosa y también son de gran importancia económica porque permiten el desarrollo de extensas plantaciones de aguacate, bosque de pino y bosque de pino-encino (INEGI, 2008).

**Acrisol** (del latín: *acris* = agrio, ácido y *solum* = suelo). Son suelos que se ubican en zonas tropicales o templadas muy lluviosas, se caracterizan por la acumulación de arcilla en el subsuelo, son ácidos con saturación de bases menor de 50%, rojos o amarillo claros con manchas rojas, pobres en nutrientes y de susceptibilidad alta a la erosión formando cárcavas (INEGI, 2008).

**Leptosol** (del griego: *leptos* = fino). Son suelos poco desarrollados al estar limitados en profundidad por roca dura continua. Se localizan en altitudes medias o altas, siendo áreas amenazadas por la erosión. Representan un recurso potencial en la estación húmeda para el pastoreo, sin embargo, la escasa profundidad puede causar sequía aun en ambientes húmedos (Correa-Pérez, 2003).

**Vertisol** (del latín: *vertere* = voltear). Es un suelo de color negro o gris oscuro, se caracteriza por su alto contenido de arcilla, la cual es expandible (Montmorillonita) en húmedo y al secarse ocasiona que los suelos se contraigan y agrieten. Este proceso

genera que se mezclen los horizontes al haber eluviación e iluviación del material arcilloso. Estas características los hace difícil de manejar, porque cuando húmedos se encharcan y son muy duros cuando secos (INEGI, 2008).

### 7.7. Vegetación

La riqueza florística del área de estudio es alta. El sistema montañoso en el que se encuentra funciona como una verdadera isla ecológica en donde la concentración de elementos endémicos es muy alta. Dada la escala del mapa se procura destacar solo la vegetación potencial del área de estudio en éste trabajo (Figura 8).

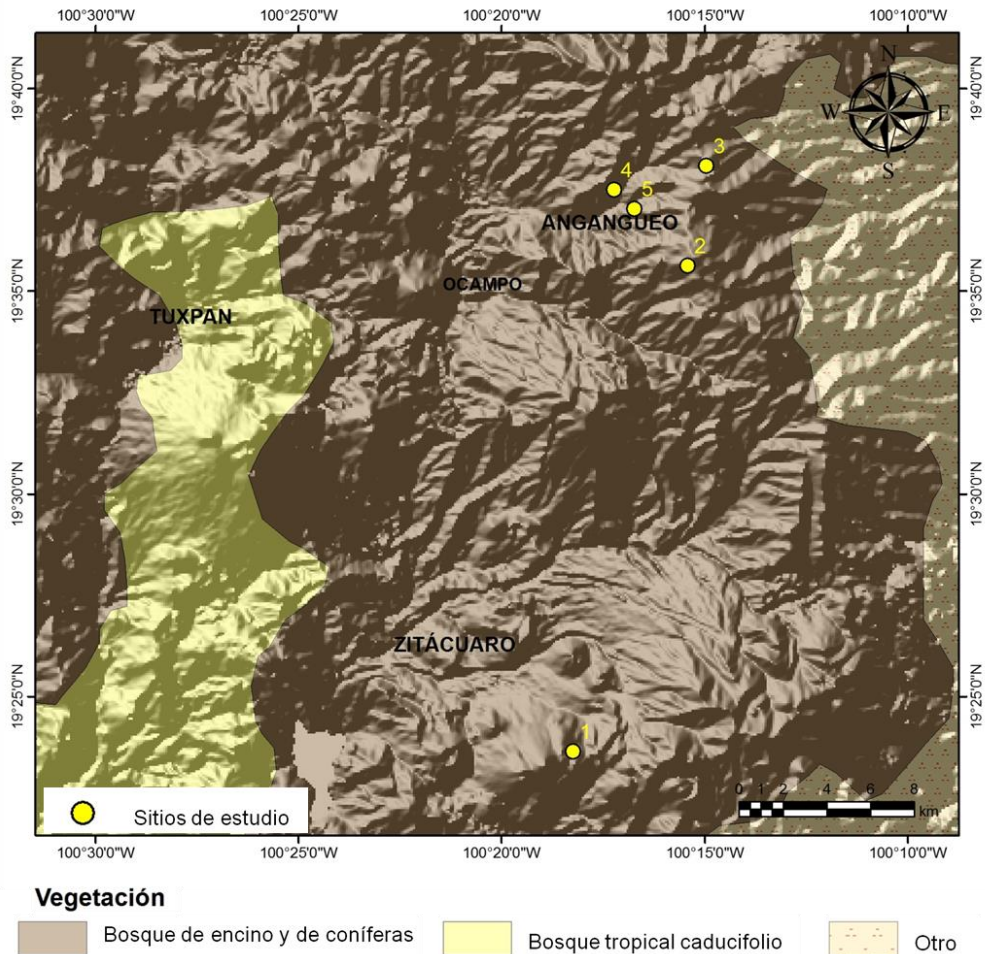


Figura 8. Mapa de vegetación de los sitios estudiados en el Oriente de Michoacán. Extracto del Atlas Geográfico del Estado de Michoacán (Correa-Pérez, 2003).

En el bosque de coníferas hay diferentes comunidades vegetales donde prevalecen los árboles perennifolios, representados por el oyamel y el pino, principalmente (Correa-Pérez, 2003).

Los bosques de *Abies* (oyamel) constituyen el componente principal del bosque de coníferas para el área de estudio, se localizan en las partes más altas de la sierra en altitudes entre 2,700 y 3,500 m, su dosel mide de 20 a 40 m. Presentan conos alargados y erectos con escamas delgadas y caedizas, hojas persistentes, aplanadas y lineales (Figura 9A). La especie más representativa de la región es *Abies religiosa* la cual es sumamente apreciada por su madera (Rzedowski y Rzedowski, 2005).

El bosque también está compuesto por variedades de *Pinus* que se encuentra en reducidas porciones, principalmente en áreas con pendientes de moderadas a fuertes y crecen en suelos profundos o someros y a veces bastante rocosos (Rzedowski y Rzedowski, 2005). Éstos presentan hojas agrupadas, largas, agudas y aciculares con vaina en la base, conos con semillas aladas, son árboles resinosos y las especies más frecuentes dentro del área de interés son *Pinus pseudostrobus*, *Pinus moctezumae* y *Pinus michoacana* (Figura 9B). Los representantes de este género constituyen las especies dominantes en los bosques del país, siendo de gran importancia económica en la producción de madera así como en la obtención de resina de donde se extraen productos diversos (Rzedowski, 1991; Ramírez, 2001).

El Bosque de *Quercus* o bosque de encino, se ha observado sobre suelos poco profundos, cuya altura varía entre 2 y 30 m llegando a alcanzar hasta 50 m, en función de la humedad disponible. Es una de las comunidades vegetales más características de las

zonas montañosas de México en áreas con clima templado y subhúmedo, presentan características como hojas escaliformes y caedizas (aunque pierde el follaje por un periodo breve), las escamas del cono femenino son duras y leñosas, el fruto es globoso (Rzedowski, 1991; Rzedowski y Rzedowski, 2005) (Figura 9C).

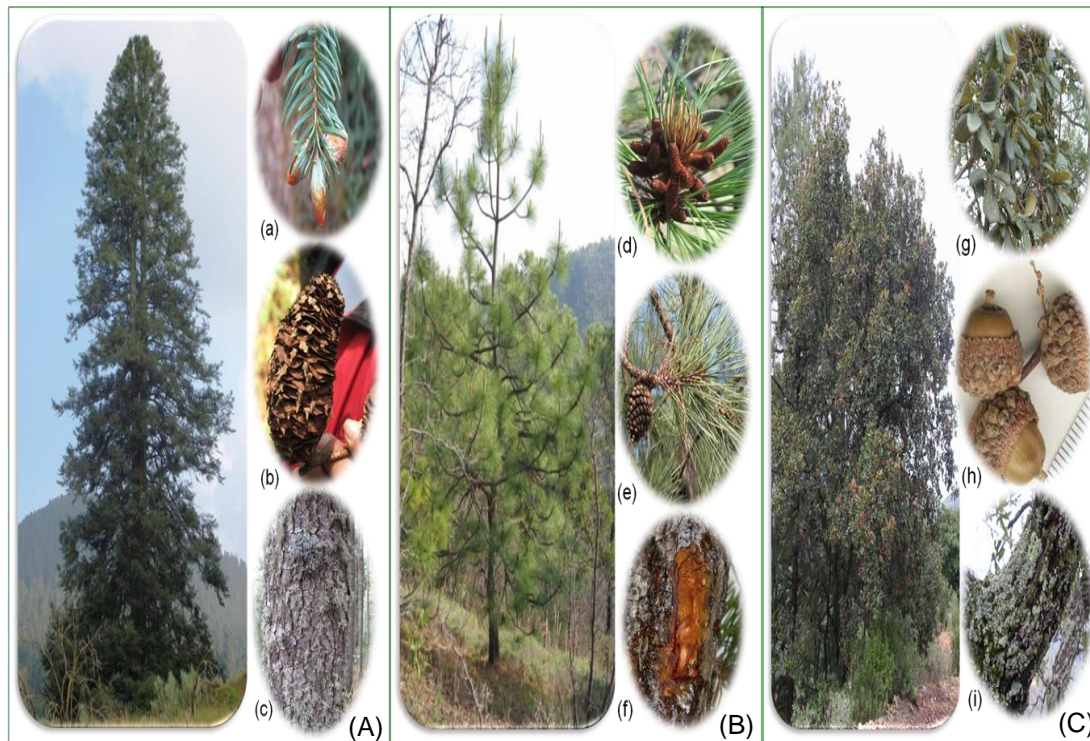


Figura 9. Bosque de *Abies* (oyamel) (A); bosque de *Pinus* (B); bosque de *Quercus* (encino) (C).  
Fotografías: M.C. Patricia Silva Sáenz.

Descripción:

- Bosque de *Abies*: ramilla mostrando hojas y escamas (a); cono femenino erecto y alargado (b); corteza de un árbol (c).
- Bosque de *Pinus*: ramilla con estróbilos masculinos (productores de polen) (d); ramilla con un cono femenino (producción de semillas) (e); corteza resinosa (f).
- Bosque de *Quercus*: hojas de forma escaliforme y caedizas (g); fruto globoso (h); corteza de un árbol (i).

## 8. METODOLOGÍA

En este apartado se muestra la metodología realizada en tres etapas: trabajo de campo, laboratorio y de gabinete (Figura 10).

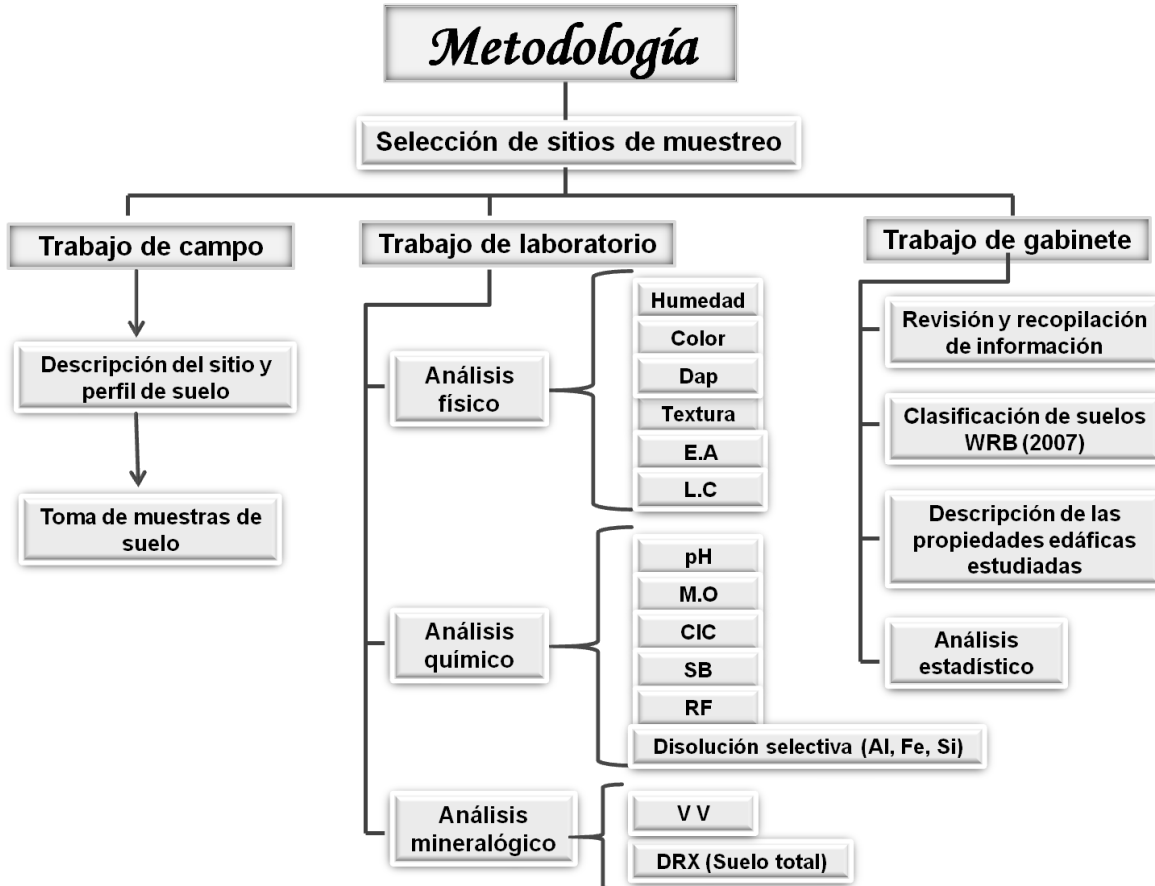


Figura 10. Cuadro sinóptico que muestra en forma resumida las tres etapas en que fue dividida la metodología.

Abreviaturas: Dap = densidad aparente; E.A = estabilidad de agregados; L.C = límites de consistencia; M.O = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; SB = saturación de bases; RF = retención de fosfatos; V V = vidrio volcánico.

### 8.1. Selección de Sitios de Muestreo

Se seleccionaron cinco sitios de muestreo al Oriente del estado de Michoacán distribuidos en condiciones similares de suelo (INEGI, 1982) y de relieve (laderas de cerro con pendientes entre 35% y 45%, excepto el Sitio 1; altitud que varía de 2596 a 3368 m, precipitación similar y con variantes en la vegetación (Cuadro 1 y Figura 11):

Cuadro 1. Localización de los sitios de muestreo en el Oriente de Michoacán.

| Sitio | Cerro         | Posición ladera | Suelo (INEGI, 1982) | Localización     | Vegetación           | Pendiente | Altitud | pp          |
|-------|---------------|-----------------|---------------------|------------------|----------------------|-----------|---------|-------------|
|       |               |                 |                     |                  |                      | %         | m       | mm          |
| 1     | El Cacique    | Media           | Andosol             | Cañada del Cajón | Pino-encino          | 60        | 2596    | 1000 a 1200 |
| 2     | El Campanario | Media           | Andosol             | El Rosario       | Oyamel               | 45        | 3444    | 1200 a 1400 |
| 3     | El Catingón   | Alta            | Andosol             | M. Angangueo     | Oyamel               | 45        | 3368    | 1200 a 1400 |
| 4     | Guadalupe     | Alta            | Andosol             | M. Angangueo     | Encino-pino          | 35        | 2855    | 1200 a 1400 |
| 5     | El Melón      | Media           | Andosol             | M. Angangueo     | Agrícola en descanso | 35        | 2752    | 1200 a 1400 |

Localización. Sitio 1, Sector Sur de Zitácuaro; Sitio 2. Mpio. de Ocampo; Sitios 3, 4 y 5. Mineral de Angangueo, todos en Michoacán. pp: precipitación.

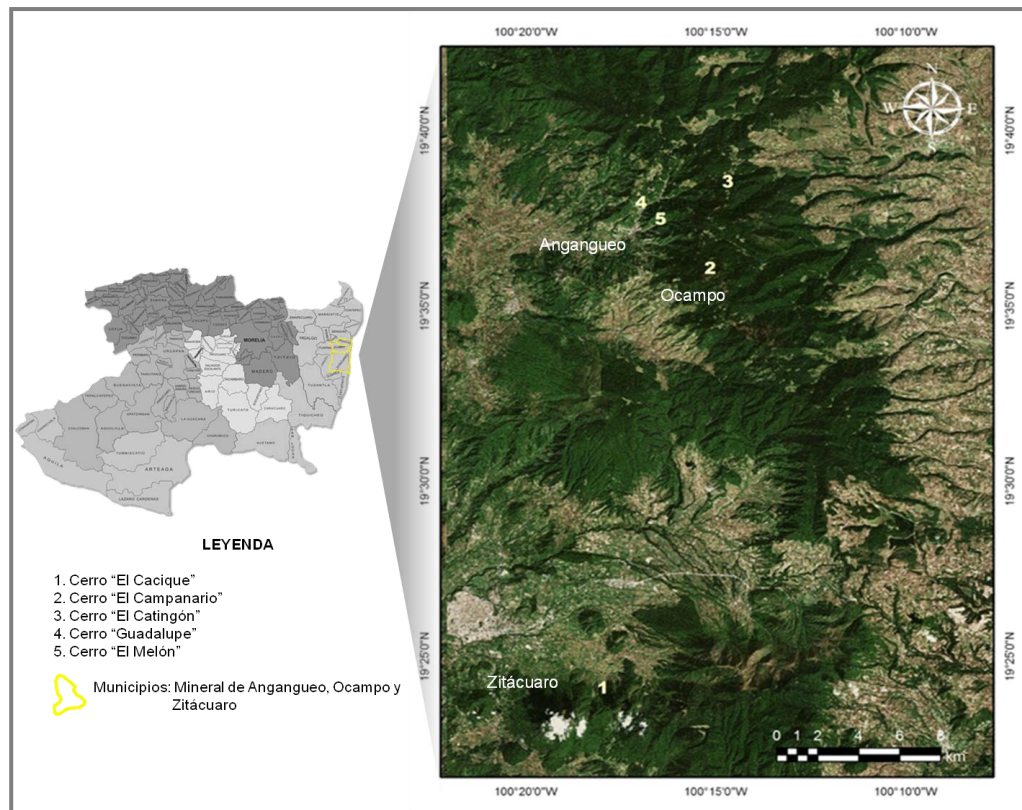


Figura 11. Ubicación de los sitios de muestreo y perfiles de suelo en el Oriente de Michoacán. Imagen tomada de Google Earth (2010).

Las laderas de los cerros son muy inclinadas, extremadamente pedregosas y desprotegidas de vegetación, zonas en donde los suelos fueron afectados por los deslizamientos ocurridos el dos de febrero de 2010.

Los sitios se eligieron por ser los de mayor impacto en los deslizamientos, los cuales se observan en imágenes de satélite como áreas muy erosionadas.

## **8.2. Trabajo de campo**

**8.2.1 Descripción de sitios y muestreo de suelos.** Se realizó la descripción ecológica y descripción morfológica del suelo en cinco sitios con base en el Manual de descripción en campo de Cuanalo (1990). Para evitar más desgaste a los suelos ya erosionados, se aprovecharon los escarpes principales de deslizamientos, eliminando el suelo que estaba expuesto a la intemperie con el fin de exponerlo para su descripción morfológica. La profundidad de los cortes de suelo fue de 170 cm (Perfil 1), 190 cm (Perfil 2), 125 cm (Perfil 3), 130 cm (Perfil 4) y 97.5 (Perfil 5). Se obtuvieron muestras de suelo de cada uno de los horizontes de los perfiles para su posterior análisis en el laboratorio.

## **8.3. Trabajo de laboratorio**

**8.3.1. Propiedades de los suelos en la fracción de tierra fina.** Al suelo (conformado por partículas de arena, limo, arcilla y materia orgánica) secado al aire y a la sombra se le hizo pasar por un tamiz de 2 mm de diámetro, suelo al que después de este proceso se le conoce como *fracción de tierra fina* (IUSS, ISRIC, FAO, 2007). Las propiedades de los suelos se determinaron mediante análisis físicos y químicos con base en la metodología descrita en el ISRIC (1995).

Previamente al secado de los suelos, se determinaron la humedad y el color del suelo (por comparación con la Tabla de Colores Munsell) en las condiciones de humedad en que se encontró en el campo.

**8.3.1.1. Físicas.** Humedad en condiciones de campo por el método gravimétrico (por diferencia de peso seco y húmedo); humedad del suelo a capacidad de campo (33 kPa) y punto de marchitez permanente (1500 kPa) mediante el uso de olla y membranas de presión; color, por comparación con la Carta de colores Munsell; densidad aparente, por el método del cilindro; textura, por el método de la pipeta de Lowy.

Estabilidad de agregados: La distribución de agregados estables en agua por tamaño se realizó de acuerdo con el método de Yoder (1936) y su interpretación se realizó con base en el Diámetro Medio Ponderado (DMP) de acuerdo con los criterios propuestos por Le Bissonnais y Le Souder (1995) como sigue:

Cuadro 2. Clases de estabilidad de agregados propuesto por Le Bissonnais y Le Souder (1995).

| Diámetro Medio Ponderado<br>mm | Estabilidad           |
|--------------------------------|-----------------------|
| < 0.4                          | Muy inestable         |
| 0.4 – 0.8                      | Inestable             |
| 0.8 – 1.3                      | Moderadamente estable |
| 1.3 – 2.0                      | Estable               |
| >2.0                           | Muy estable           |

Límites de consistencia de Atterberg (Límite líquido y Límite plástico). El límite líquido se determinó mediante el método de Casagrande y el Límite plástico a partir de la metodología de los rollitos de tres milímetros (Juárez, 2012).

**8.3.1.2. Químicas.** El pH se determinó en agua (1:2.5) y en NaF (1:5). La materia orgánica se obtuvo por combustión húmeda con el método de Walkley y Black. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) y las bases intercambiables se determinaron por el método del acetato de amonio 1N pH 7, se obtuvo la concentración de Ca y Mg por

volumetría y de Na y K por espectroscopía de emisión (flamómetro). La saturación de bases se obtuvo dividiendo la suma de bases intercambiables entre la CIC. La retención de fósforo se realizó por el método de Blakemore *et al.* (1987). Se llevaron a cabo extracciones por disolución selectiva de: (i) Al, Fe, Si con oxalato ácido de amonio para determinar la presencia de compuestos de rango corto como alofano y ferrihidrita; (ii) Al y Fe con ditionito citrato bicarbonato, para determinar la presencia de Al y Fe que forma complejos con el humus, y de alofano, según Wada (1977); y (iii) Al y Fe con pirofosfato para determinar la presencia de Al y Fe que forma complejos con el humus, según la propuesta de Higashi y Shinagawa (1981)), los tres elementos Al, Fe y Si se determinaron por espectroscopía de absorción atómica (Figura 12).



Figura 12. Espectroscopio de absorción atómica.

De acuerdo con los porcentajes de Al, Fe y Si extraídos por disolución selectiva, se utilizó la información presentada en el Cuadro 3 para identificar el tipo de componentes amorfos presentes en los suelos estudiados.

Cuadro 3. Criterios que definen la presencia de minerales amorfos y órgano-minerales (Tomado de Alcalá, 2003).

| Criterio                      | Valor                 | Amorfos                          | Autores                                   |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------------------|---|
| % $(Al_o + \frac{1}{2} Fe_o)$ | $\geq 2$              | alofano, imogolita, ferrihidrita | Parfitt y Clayden (1991)                  |
| $Si_o/Al_o$                   | $\approx 0.5$         | imogolita                        | Parfitt <i>et al.</i> (1984); Wada (1989) |
| $Al_p/Al_d$                   | $\approx 1.0$ ó $1.0$ | complejos Al-humus               | Shoji y Fujiwara (1984)                   |
| $Fep/Fed$                     | $> 0.5 < 1.0$         | complejos Fe-humus               | Shoji y Fujiwara (1984)                   |

$Al_o$ ,  $Fe_o$ ;  $Al_d$ ,  $Fed$ ;  $Al_p$ ,  $Fep$  = aluminio y hierro extraídos con OXA, DCB, y PIR, respectivamente.

El contenido de *alófano* se determinó mediante la ecuación propuesta por Mizota y Van Reeuwijk (1989):  $Y = -5.1X + 23.4$ , en donde “Y” es el porcentaje de alofano y “X” es la relación  $Al_o-Al_p/Si_o$ ; alofano e imogolita en conjunto se estimaron del porcentaje de  $Si_o$  multiplicado por el factor 8 propuesto en Parfitt y Wilson (1985) (Childs *et al.*, 1991) y la ferrihidrita, del porcentaje de  $Fe_o$  multiplicado por el factor 1.7 (ISRIC, 1995).

**8.3.1.3. Mineralógicas.** El análisis mineralógico se realizó para cuantificar el vidrio volcánico con fines de clasificación de suelos y para la identificación de minerales primarios y arcillas por difracción de rayos X (DRX).

**Vidrio volcánico (VV).** La obtención del VV se logró mediante varios pasos: Al determinar la textura del suelo (apartado de propiedades físicas) se separaron de la fracción de tierra fina, las partículas de arena del tamaño de 2.0 a 0.05 mm de diámetro utilizando un tamiz de 0.05 mm. De las partículas de arena se aislaron mediante tamices las arenas de clase media con diámetro de 0.2 a 0.63 mm, las cuales se montaron en porta objetos para identificar el vidrio volcánico con el apoyo de un microscopio óptico de luz polarizada marca Olympus (Figura 13a). El porcentaje de vidrio se determinó con base en 100 granos minerales (ISRIC, 1995).

**Difracción de Rayos X (DRX) en la fracción de tierra fina.** Se tomaron muestras de suelo de la fracción de tierra fina y mediante el método de polvos se prepararon para ser leídas mediante DRX. Los difractogramas se corrieron de  $0^\circ$  a  $70^\circ 2\theta$  en el equipo SIEMENS-5000 con ánodo de Cu y radiación  $K\alpha$  (Figura 13b) a una longitud de onda de  $1.5406 \text{ \AA}$ . Los difractogramas obtenidos se compararon con la base de datos del equipo de DRX y del programa Match para identificar los minerales presentes en los suelos.



Figura 13. Imagen del microscopio óptico de luz polarizada utilizado para la cuantificación del V V (a). Equipo de Difracción de Rayos SIEMENS-500 (b).

#### 8.4. Trabajo de gabinete

**8.4.1. Clasificación de Suelos.** Con apoyo de la descripción morfológica en campo, los análisis físicos, químicos y el vidrio volcánico, se clasificó a los suelos de acuerdo con el sistema de clasificación conocido como WRB (Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo), para ello se identificaron los horizontes genéticos y de diagnóstico (epipedón y endopedón) así como las propiedades y materiales de diagnóstico y una vez que se contó con esta información se comparó con los requerimientos del WRB para encontrar el Grupo de Referencia del suelo (IUSS-ISRIC-FAO, 2007).

#### **8.4.2. Análisis estadístico**

Se procesaron 27 muestras de suelo en el Software Statgraphics plus v.5.1 correspondientes a las propiedades físicas y químicas de los suelos con el fin de realizar un análisis multivariado tipo discriminante. El análisis estadístico se realizó a las siguientes propiedades de los suelos que representan a las variables en dicho análisis: a) macro, meso y microagregados con el diámetro medio ponderado (DMP); b) DMP con la textura (arena, limo y arcilla),  $Al+1/2Fe$ , alofano, ferrihidrita, materia orgánica, complejos de humus-Al y humus-Fe e índice de límite plástico.

### **9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **9.1. Descripción de los suelos**

En el presente apartado se muestran los resultados por sitio de trabajo (Sitios y Perfiles del 1 al 5), cuyos datos en extenso se presentan en el Anexo 1. Un concentrado de la descripción morfológica de los suelos se muestra en el Cuadro 4 y de los datos analíticos en el Cuadro 5. En la descripción mineralógica se presenta al vidrio volcánico (Cuadro 6) y la Difracción de Rayos X.

##### **9.1.1. Sitio y Perfil Uno**

**9.1.1.1. Descripción del sitio.** Se ubica en la “Cañada del Cajón” en el sector sur de Zitácuaro a una altitud de 2,596 m en un terreno con pendiente de 60% con un microrelieve accidentado, el drenaje superficial corresponde a un sitio donador en el cual, de acuerdo con Cuanalo (1990) los escurrimientos exceden a la cantidad de agua que recibe el sitio. El uso del suelo es forestal con cobertura arbórea y arbustiva densa.

Cuadro 4. Morfología en suelos al Oriente de Michoacán.

| Horizonte | Espesor   | Color<br>Húmedo | Humedad            | Estructura | Consistencia | Raíces <sup>1</sup> | Reacción<br>H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | Fauna      | Otros      | Limite<br>Horiz              |
|-----------|-----------|-----------------|--------------------|------------|--------------|---------------------|---|------------|------------|------------------------------|
| Cm        |           |                 |                    |            |              |                     |   |            |            |                              |
| Perfil 1  |           |                 |                    |            |              |                     |   |            |            |                              |
| A         | 0-22      | 10YR 2/2        | Húmedo             | GR-BS      | Muy friable  | Muy abundantes      | Tenue                                     | mudas      | APG        | Horizontal marcado           |
| A2        | 22-65     | 7.5YR 3/2       | Húmedo             | BS         | Muy friable  | Comunes             | Tenue                                     | -          | APG        | Horizontal medio e irregular |
| A3        | 65-110    | 7.5YR 3/2       | Húmedo             | BS         | Muy friable  | Comunes             | Tenue                                     | -          | APG        | Ondulado medio e irregular   |
| C         | 110-170   | 7.5YR 4/1       | Húmedo             | BS         | Muy friable  | Raras               | Nula                                      | -          | gravas     | -                            |
| Perfil 2  |           |                 |                    |            |              |                     |   |            |            |                              |
| A         | 0-20      | 7.5YR 2.5/1     | Húmedo             | BS- GR     | Friable      | Comunes -Raras      | Tenue                                     | Lombrices  | CV         | Horizontal medio             |
| A2        | 20-51     | 7.5YR 2.5/1     | Húmedo             | BS- GR     | Friable      | Comunes-Muy Raras   | Tenue                                     | -          | MI         | Horizontal medio             |
| A3        | 51-65     | 7.5YR 2.5/1     | Húmedo             | BS- GR     | Friable      | Comunes -Raras      | Tenue                                     | -          | -          | Horizontal medio             |
| AC        | 65-83     | 7.5YR 2.5/1     | Húmedo             | CO- BS     | Friable      | Comunes -Raras      | Nula                                      | -          | RO         | Ondulado medio               |
| C         | 83-95     | 7.5YR 3/1       | Húmedo             | BS         | Firme        | Pocas               | Nula                                      | -          | -          | Ondulado medio               |
| C2        | 95-117    | 7.5YR 3/1       | Húmedo             | CO- BS     | Firme        | Raras               | Nula                                      | -          | -          | Ondulado medio e irregular   |
| 2AC       | 117-144   | 7.5YR 2.5/1     | Húmedo             | CO- BS     | Firme        | Raras-Muy Raras     | Nula                                      | -          | ceniza     | Ondulado medio e irregular   |
| C         | 144-190   | 2.5Y 6/4        | Húmedo             | BS         | Firme        | Muy Raras           | Nula                                      | -          | -          | -                            |
| Perfil 3  |           |                 |                    |            |              |                     |   |            |            |                              |
| A         | 0-23      | 7.5YR 2.5/1     | Húmedo             | GR         | Friable      | Abundantes-Raras    | Tenue                                     | Lombrices  | Tixotropía | Horizontal marcado           |
| A2        | 23-50     | 7.5YR 2.5/1     | Húmedo             | BS         | Muy friable  | Comunes-Pocas       | Tenue                                     | -          | Tixotropía | Horizontal marcado           |
| C         | 50-80     | 7.5YR 4/1       | Húmedo             | BS         | Friable      | Pocas-Raras         | Nula                                      | -          | Tixotropía | Horizontal marcado           |
| C2        | 80-125    | 10YR 5/4        | Húmedo             | BS         | Friable      | -                   | Nula                                      | -          | CV         | -                            |
| Perfil 4  |           |                 |                    |            |              |                     |   |            |            |                              |
| A         | 0-5       | 7.5YR 4/2       | Seco               | GR         | Blanda       | Comunes-Raras       | Moderada                                  | -          | Cuarzo-CV  | Horizontal marcado           |
| A2        | 5-30      | 7.5YR 4/2       | Seco               | BS         | Blanda       | Raras-Comunes       | Tenue                                     | Cienpies   | Cuarzo-CV  | Horizontal marcado           |
| C         | 30-41     | 7.5YR 5/2       | Seco               | BS         | Friable      | Pocas-Raras         | Tenue                                     | -          | Cuarzo-CV  | Horizontal marcado           |
| C2        | 41-64     | 10YR 5/4        | Ligeramente húmedo | BS         | Muy friable  | Pocas               | Nula                                      | -          | Cuarzo-CV  | Horizontal marcado           |
| C3        | 64-80     | 7.5YR 4/6       | Ligeramente húmedo | BS         | Firme        | Pocas               | Nula                                      | -          | Cuarzo-CV  | Horizontal marcado           |
| C4        | 80-88     | 7.5YR ¾         | Húmedo             | BS         | Firme        | Pocas               | Nula                                      | -          | Cuarzo-CV  | Horizontal marcado           |
| C5        | 88-130    | 10YR 6/6        | Húmedo             | BS         | Firme        | Pocas-Raras         | Nula                                      | -          | Cuarzo-CV  | -                            |
| Perfil 5  |           |                 |                    |            |              |                     |   |            |            |                              |
| A         | 0-17.5    | 10YR 4/3        | Seco               | BS- GR     | Blanda       | Abundantes-Raras    | Tenue                                     | -          | CV         | Ondulado marcado             |
| C         | 17.5-47.5 | 7.5YR ¾         | Ligeramente húmedo | BS- GR     | Muy friable  | Pocas-Raras         | Nula                                      | Escarabajo | CV         | Ondulado marcado             |
| 2C        | 47.5-65   | 7.5YR 5/6       | Húmedo             | Masiva     | Muy friable  | Pocas-Raras         | Nula                                      | -          | CV         | Ondulado marcado             |
| 3C        | 65-97.5   | 5YR 4/6         | Húmedo             | Masiva     | Muy friable  | Raras               | Nula                                      | -          | CV         | -                            |

GR = granular; BS = Bloques subangulares; CO = columnar; APG = abundantes piedras grandes; CV = carbón vegetal; MI= material intemperizado; RO = raíz oxidada..

<sup>1</sup> Raíces en 3 dcm<sup>2</sup>: muy raras (menor de 1); raras (3 a 5); pocas (5 a 10); comunes (10 a 100); muy abundantes (100 a 500); extremadamente abundantes (más de 500).

Cuadro 5. Propiedades físicas y químicas de suelos estudiados en el Oriente de Michoacán.

| Horiz | Espesor<br>cm | Retención de agua |                |                  | Textura |        |        | Ct | Dap<br>gcm <sup>-3</sup> | pH                        |             |                       | M.O<br>% | Bases intercambiables                         |                     |                       |      |      | CIC  | SB | RF   | Alo<br>% | Feo  | Alo+<br>½ Feo |
|-------|---------------|-------------------|----------------|------------------|---------|--------|--------|----|--------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|----------|---|---------------------|-----------------------|------|------|------|----|------|----------|------|---------------|
|       |               | CA<br>-           | 33<br>KPa<br>% | 1500<br>KPa<br>- | A<br>-  | L<br>% | R<br>- |    |                          | 1:2.5<br>H <sub>2</sub> O | 1:50<br>NaF | Ca <sup>++</sup><br>- |          | Mg <sup>++</sup><br>cmol (+) kg <sup>-1</sup> | K <sup>+</sup><br>- | Na <sup>+</sup><br>-- | SUM  |      |      |    |      |          |      |               |
| P1    |               |                   |                |                  |         |        |        |    |                          |                           |             |                       |          |   |                     |                       |      |      |      |    |      |          |      |               |
| A     | 0-22          | 56.3              | 54.7           | 26.3             | 32.6    | 63.5   | 4.0    | FL | 0.58                     | 5.9                       | 11.47       | 16.3                  | 2.77     | 0.23  | 0.02                | 0.04                  | 3.0  | 32.4 | 9.4  | 91 | 3.27 | 0.31     | 3.42 |               |
| A2    | 22-65         | 50.2              | 48.2           | 26.1             | 33.6    | 58.8   | 7.6    | FL | 0.70                     | 6.0                       | 11.48       | 11.0                  | 3.61     | 0.2   | 0.01                | 0.06                  | 3.9  | 29.3 | 13.2 | 90 | 4.17 | 0.40     | 4.37 |               |
| A3    | 65-110        | 46.1              | 44.6           | 22.2             | 33.5    | 59.0   | 7.6    | FL | 0.70                     | 6.1                       | 11.47       | 11.3                  | 4.91     | 0.16  | 0.01                | 0.04                  | 5.1  | 19.5 | 26.2 | 91 | 4.40 | 0.36     | 4.59 |               |
| C     | 110-170       | 36.7              | 42.8           | 22.3             | 36.1    | 56.4   | 7.6    | FL | 0.89                     | 6.2                       | 11.48       | 9.5                   | 2.67     | 0.15  | 0.02                | 0.04                  | 2.29 | 29.3 | 9.8  | 84 | 4.04 | 0.31     | 4.20 |               |
| P2    |               |                   |                |                  |         |        |        |    |                          |                           |             |                       |          |   |                     |                       |      |      |      |    |      |          |      |               |
| A     | 0-20          | 59.7              | 56.0           | 27.9             | 18.6    | 71.1   | 10.4   | FL | 0.65                     | 5.6                       | 10.8        | 12.0                  | 0.36     | 0.46  | 0.42                | 0.06                  | 0.9  | 22.4 | 3.9  | 72 | 1.90 | 0.77     | 2.28 |               |
| A2    | 20-51         | 59.4              | 57.1           | 29.0             | 18.9    | 68.3   | 12.8   | FL | 0.72                     | 5.9                       | 10.6        | 13.2                  | 2.69     | 0.61  | 0.47                | 0.06                  | 3.4  | 43.7 | 7.7  | 71 | 2.05 | 0.75     | 2.42 |               |
| A3    | 51-65         | 53.2              | 48.5           | 24.4             | 18.4    | 64.9   | 16.8   | FL | 0.65                     | 5.9                       | 10.5        | 7.9                   | 9.84     | 3.38  | 0.41                | 0.11                  | 13.3 | 18.6 | 71.4 | 70 | 2.26 | 0.85     | 2.68 |               |
| AC    | 65-83         | 59.2              | 46.2           | 22.9             | 19.7    | 57.6   | 22.8   | FL | 0.81                     | 5.9                       | 10.5        | 6.3                   | 1.81     | 0.72  | 0.28                | 0.09                  | 2.6  | 43.9 | 6.0  | 63 | 1.55 | 0.71     | 1.91 |               |
| C     | 83-95         | 35.8              | 36.8           | 22.2             | 16.8    | 60.4   | 22.8   | FL | 0.9                      | 6.0                       | 9.6         | 5.4                   | 19.8     | 0.52  | 0.29                | 0.17                  | 20.5 | 21.8 | 93.7 | 32 | 0.95 | 0.60     | 1.25 |               |
| C2    | 95-117        | 32.9              | 35.7           | 21.7             | 20.9    | 55.2   | 24.0   | FL | 1.32                     | 6.2                       | 8.4         | 4.6                   | 3.38     | 1.36  | 0.20                | 0.15                  | 4.9  | 44.0 | 11.1 | 0  | 0.42 | 0.50     | 0.67 |               |
| 2AC   | 117-144       | 32.5              | 55.4           | 31.0             | 26.1    | 69.5   | 4.4    | FL | 0.94                     | 5.5                       | 11.9        | 12.6                  | 2.55     | 1.45  | 0.04                | 0.04                  | 4.0  | 31.1 | 13.0 | 99 | 4.86 | 2.10     | 5.91 |               |
| C     | 144-190       | 33.3              | 46.9           | 27.1             | 33.9    | 53.8   | 12.4   | FL | 0.94                     | 6.5                       | 9.1         | 0.5                   | 5.05     | 0.24  | 0.13                | 0.21                  | 5.5  | 52.4 | 10.5 | 0  | 0.27 | 0.25     | 0.39 |               |
| P3    |               |                   |                |                  |         |        |        |    |                          |                           |             |                       |          |   |                     |                       |      |      |      |    |      |          |      |               |
| A     | 0-23          | 67.8              | 54.4           | 28.8             | 23.0    | 66.7   | 10.4   | FL | 0.61                     | 5.7                       | 11.2        | 16.7                  | 9.97     | 4.22  | 0.32                | 0.06                  | 14.3 | 29.1 | 48.9 | 95 | 2.10 | 0.73     | 2.33 |               |
| A2    | 23-50         | 66.2              | 45.3           | 23.8             | 23.3    | 66.0   | 10.8   | FL | 0.63                     | 5.5                       | 11.4        | 9.1                   | 17.6     | 0.49  | 0.19                | 0.02                  | 18.2 | 35.5 | 51.2 | 98 | 2.78 | 0.80     | 3.18 |               |
| C     | 50-80         | 48.4              | 45.7           | 22.4             | 25.3    | 57.5   | 17.2   | FL | 0.87                     | 5.5                       | 11.2        | 3.1                   | 5.55     | 0.21  | 0.22                | 0.04                  | 5.8  | 22.2 | 26.1 | 94 | 1.97 | 0.55     | 2.25 |               |
| 2C    | 80-125        | 35.8              | 35.3           | 16.9             | 23.6    | 60.1   | 16.4   | FL | 0.92                     | 5.6                       | 10.4        | 0.0                   | 7.65     | 0.35  | 0.18                | 0.06                  | 8.1  | 29.3 | 27.5 | 67 | 0.73 | 0.35     | 0.0  |               |
| P4    |               |                   |                |                  |         |        |        |    |                          |                           |             |                       |          |   |                     |                       |      |      |      |    |      |          |      |               |
| A     | 0-5           | 10.1              | 32.4           | 16.1             | 39.9    | 49.7   | 10.4   | F  | 0.69                     | 6.2                       | 8.9         | 5.8                   | 1.4      | 1.32  | 0.36                | 0.04                  | 2.8  | 20.2 | 13.7 | 27 | 0.22 | 0.33     | 0.40 |               |
| A2    | 5-30          | 10.9              | 30.8           | 14.1             | 33.9    | 53.7   | 12.4   | FL | 0.70                     | 6.2                       | 8.9         | 3.0                   | 0.97     | 1.58  | 0.22                | 0.02                  | 2.6  | 22.7 | 11.3 | 32 | 0.32 | 0.40     | 0.52 |               |
| C     | 30-41         | 12.4              | 27.8           | 14.6             | 38.4    | 48.4   | 13.2   | F  | 0.74                     | 6.5                       | 8.8         | 1.7                   | 0.87     | 0.78  | 0.25                | 0.11                  | 1.8  | 19.3 | 9.1  | 20 | 0.20 | 0.33     | 0.36 |               |
| C2    | 41-64         | 15.1              | 22.7           | 14.0             | 35.1    | 50.6   | 14.4   | FL | 1.04                     | 6.5                       | 8.8         | 1.1                   | 1.78     | 2.37  | 0.14                | 0.06                  | 4.2  | 23.7 | 17.8 | 15 | 0.09 | 0.23     | 0.21 |               |
| C3    | 64-80         | 16.7              | 23.7           | 12.8             | 39.6    | 41.7   | 18.8   | F  | 1.21                     | 6.5                       | 8.8         | 1.1                   | 8.3      | 2.4   | Tz                  | Tz                    | 10.7 | 18.5 | 57.7 | 20 | 0.31 | 0.22     | 0.42 |               |
| C4    | 80-88         | 20.1              | 25.3           | 14.0             | 38.9    | 43.2   | 18.0   | F  | 1.04                     | 6.5                       | 8.7         | 1.1                   | 1.33     | 2.71  | 0.22                | 0.04                  | 4.1  | 18.9 | 21.6 | 20 | 0.30 | 0.24     | 0.42 |               |
| C5    | 88-130        | 20.1              | 24.0           | 15.1             | 30.1    | 43.9   | 26.0   | F  | 0.97                     | 6.5                       | 8.7         | 0.7                   | 0.82     | 2.73  | 0.23                | 0.02                  | 3.6  | 12.4 | 28.8 | 9  | 0.15 | 0.18     | 0.24 |               |
| P5    |               |                   |                |                  |         |        |        |    |                          |                           |             |                       |          |   |                     |                       |      |      |      |    |      |          |      |               |
| A     | 0-17.5        | 16.8              | 34.8           | 15.1             | 29.8    | 49.5   | 20.8   | F  | 0.89                     | 5.7                       | 9.9         | 5.9                   | 1.77     | 3.94  | 0.20                | 0.02                  | 5.7  | 25.8 | 22.2 | 70 | 0.69 | 0.48     | 0.93 |               |
| C     | 17.5-47.5     | 19.7              | 28.1           | 15.0             | 23.9    | 51.7   | 24.4   | FL | 1.46                     | 5.4                       | 9.9         | 1.9                   | 6.37     | 0.49  | 0.24                | 0.02                  | 6.9  | 14.6 | 47.3 | 65 | 0.66 | 0.46     | 0.89 |               |
| 2C    | 47.5-65       | 25.4              | 25.9           | 13.3             | 27.8    | 51.8   | 20.4   | FL | 1.39                     | 5.5                       | 9.0         | 1.5                   | 6.42     | 1.43  | 0.02                | 0.04                  | 7.9  | 24.6 | 32.1 | 24 | 0.12 | 0.19     | 0.21 |               |
| 3C    | 65-97.5       | 25.9              | 30.9           | 19.3             | 21.8    | 45.9   | 32.4   | FR | 1.38                     | 5.3                       | 8.8         | 0.7                   | 4.74     | 1.04  | 0.04                | 0.09                  | 5.9  | 12.7 | 46.1 | 31 | 0.15 | 0.18     | 0.24 |               |

Horiz = símbolo del horizonte; CA = condiciones de campo; A = arena; L = limo; R = arcilla; Ct = Clase textural; FL = franco limoso; F = franco; FR = franco arcilloso; Dap = densidad aparente; M.O = materia orgánica; SUM = suma de bases intercambiables; CIC = capacidad de intercambio catiónico; SB = saturación de bases; Tz = elementos traza; RF = Retención de fosfatos; Alo, Feo = Al y Fe extraídos con oxalato.

Cuadro 6. Descripción de vidrio volcánico en suelos del Oriente de Michoacán con apoyo del microscopio óptico de luz polarizada en el objetivo 10X\*.

| Horizonte | Espesor   | Color             | Turbidez | Forma          | Inclusiones   | Tamaño | Vidrio volcánico |
|-----------|-----------|-------------------|----------|----------------|---------------|--------|------------------|
|           | cm        |                   |          |                |               | mm     | %                |
| Perfil 1  |           |                   |          |                |               |        |                  |
| A         | 0-22      | -                 | -        | -              | -             | -      | Np               |
| A2        | 22-65     | -                 | -        | -              | -             | -      | Np               |
| A3        | 65-110    | -                 | -        | -              | -             | -      | Np               |
| C         | 110-170   | -                 | -        | -              | -             | -      | Np               |
| Perfil 2  |           |                   |          |                |               |        |                  |
| A         | 0-20      | Pardo amarillento | Si       | Semiredondeada | En los bordes | 0.35   | 22               |
| A2        | 20-51     | Pardo oscuro      | Si       | Semiredondeada | En los bordes | 0.34   | 18               |
| A3        | 51-65     | Pardo oscuro      | Si       | Subangular     | Si            | 0.38   | 24               |
| AC        | 65-83     | Pardo amarillento | Si       | Subangular     | En los bordes | 0.46   | 29               |
| C         | 83-95     | Pardo amarillento | poca     | Irregular      | En los bordes | 0.20   | 11               |
| C2        | 95-117    | Pardo amarillento | Si       | Irregular      | No            | 0.22   | 9                |
| 2AC       | 117-144   | -                 | -        | -              | -             | -      | Np               |
| C         | 144-190   | Pardo amarillento | Si       | Irregular      | si            | 0.60   | 2                |
| Perfil 3  |           |                   |          |                |               |        |                  |
| A         | 0-23      | Pardo oscuro      | Si       | Irregular      | Si            | 0.32   | 3                |
| A2        | 23-50     | Pardo oscuro      | Si       | Alargada       | En los bordes | 0.25   | 2                |
| C         | 50-80     | Pardo amarillento | Si       | Subangular     | En los bordes | 0.21   | 2                |
| C2        | 80-125    | Pardo amarillento | Si       | Subangular     | Si            | 0.25   | 3                |
| Perfil 4  |           |                   |          |                |               |        |                  |
| A         | 0-5       | Pardo amarillento | Si       | Irregular      | En los bordes | 0.25   | 73               |
| A2        | 5-30      | Pardo amarillento | Si       | Irregular      | Si            | 0.34   | 89               |
| C         | 30-41     | Pardo amarillento | Si       | Subangular     | En los bordes | 0.20   | 84               |
| C2        | 41-64     | Pardo amarillento | Si       | Irregular      | En los bordes | 0.40   | 90               |
| C3        | 64-80     | Pardo amarillento | Si       | Subangular     | Si            | 0.30   | 85               |
| C4        | 80-88     | Pardo amarillento | Si       | Irregular      | Si            | 0.35   | 52               |
| C5        | 88-130    | Pardo amarillento | Si       | Irregular      | Si            | 0.15   | 47               |
| Perfil 5  |           |                   |          |                |               |        |                  |
| A         | 0-17.5    | Amarillo          | Si       | Irregular      | Si            | 0.38   | 5                |
| C         | 17.5-47.5 | Amarillo          | Si       | Subangular     | Si            | 0.27   | 8                |
| 2C        | 47.5-65   | -                 | -        | -              | -             | -      | Nd               |
| 3C        | 65.97.5   | -                 | -        | -              | -             | -      | Nd               |

\* Objetivo 10X = 0.01 mm; Np = no presenta; Nd: no determinado.

**9.1.1.2. Caracterización morfológica.** Se clasificó a un horizonte genético A en los primeros 110 cm de espesor caracterizado por la actividad biológica representada por la abundancia de raíces, además en el horizonte superficial existe estructura de tipo granular, característica de este horizonte (Figuras 14a y 14b). En cuanto a la agregación del suelo, Ibarra *et al.* (2006) señala que las raíces son un factor muy importante en la agregación del suelo. En todo el perfil de suelo también hay estructura de bloques subangulares con un grado de desarrollo débil, estructura que se forma por procesos

físicos de expansión-contracción y por procesos biológicos por redondeo de las raíces y los organismos del suelo (Pape y Lager, 1994), es decir, la consistencia del suelo es friable, esto significa que cuando está húmedo se desmenuza con facilidad y no se comprime cuando se une (Cuanalo, 1990).

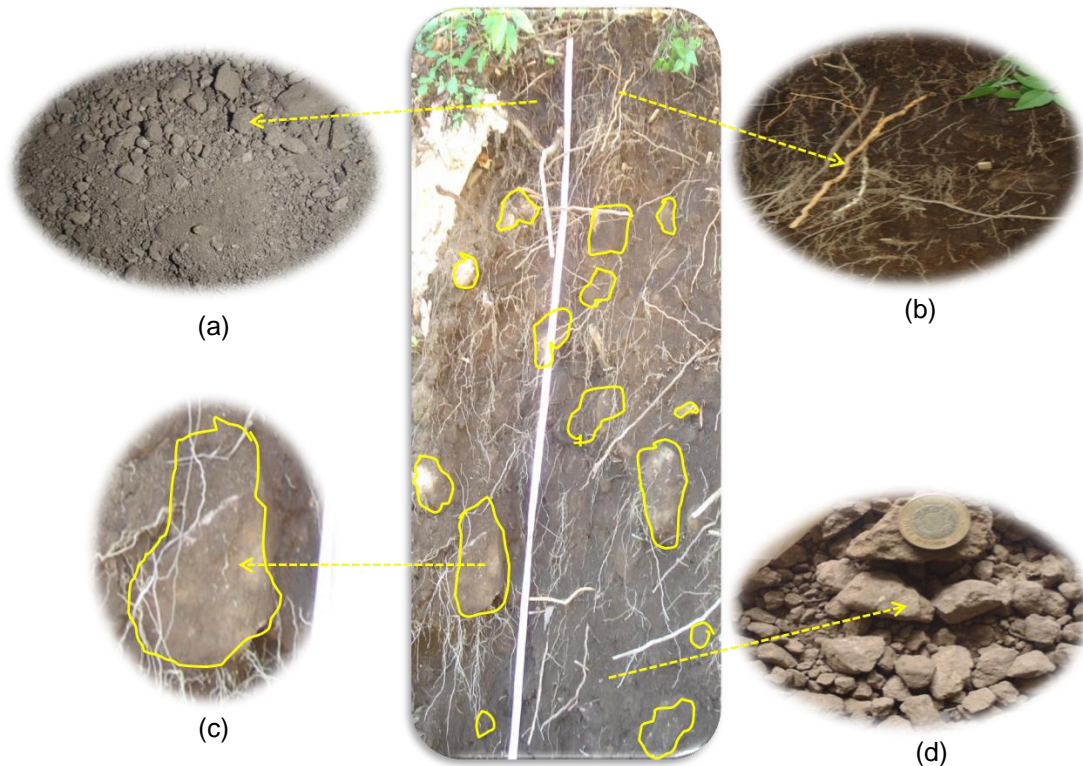


Figura 14. Morfología del Perfil 1: (a) estructura granular y pequeños bloques subangulares de consistencia friable; (b) raíces muy abundantes; (c) fragmentos de roca; (d) fragmentos de roca pequeños y gravas.

El color del suelo varía de café muy oscuro en el horizonte A a gris oscuro conforme aumenta la profundidad. Se clasificó a un horizonte C de los 110 a 170 cm de profundidad, cuyas características corresponde a un material no consolidado con abundantes fragmentos de roca grandes y pequeñas, además de gravas (de 50 a 75%) que van de 20 cm hasta 2mm de diámetro, respectivamente (Figuras 14c y 14d).

**9.1.1.3. Propiedades físicas y químicas.** La retención de agua a 33 KPa fue mayor en el horizonte superficial con un 55% y disminuyó en los horizontes subsuperficiales a 43%, mientras que a 1 500 KPa la variación fue menor (26 a 22%), en ambos casos la retención de agua tiende a disminuir con la profundidad en los suelos forestales (Meza-Pérez y Geissert- Kientz, 2006).

La clase textural es franco limosa con 59% en promedio de partículas de limo y máximo de 7.6% de arcillas. Los altos contenido de limo son característicos de los suelos con propiedades ándicas (Yamada *et al.*, 1975). La densidad aparente presenta valores bajos que varían de  $0.60 \text{ g cm}^{-3}$  en el horizonte A a menos de  $0.90 \text{ g cm}^{-3}$  en el horizonte C; los valores más bajos de la densidad se relacionan con la presencia de MO, de materiales con alto espacio poroso y con las propiedades ándicas (IUSS-ISRIC-FAO, 2007).

El pH en agua es ligeramente ácido y varía de 5.9 en la superficie a 6.3 en el subsuelo. La MO es muy alta (16.3%) en el horizonte A a media (9.5%) en el horizonte C. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) tiende a disminuir con la profundidad de 32 a  $19.5 \text{ c mol}(+) \text{ kg}^{-1}$  y la saturación de bases (SB) incrementa conforme la profundidad del suelo, siendo de 9.4% en la superficie a 26.2% en el horizonte A3 en donde se aprecia un marcado incremento de  $\text{Ca}^{++}$  y por consecuencia en la SB. De acuerdo con Rodríguez (1999) los valores de SB de este suelo se consideran bajos, lo cual se asocia a un lavado importante de bases intercambiables.

Los porcentajes de retención de fosfatos y de  $\text{Al} + 1/2\text{Fe}$  en los horizontes A, son mayores de 85% y 2%, respectivamente, lo que significa que se trata de un suelo con

propiedades ándicas bien desarrolladas donde dominan los materiales amorfos alófono y ferrihidrita como lo mencionan Parfitt y Clayden (1991).

#### 9.1.1.4. Descripción mineralógica

**a) Vidrio volcánico (V V).** En el Perfil 1 no se encontró vidrio volcánico (Cuadro 6). Egawa (1977) señala que el contenido de vidrio volcánico es alto en suelos con poco desarrollo y bajo en los bien expresados, por este motivo se espera que el presente suelo tenga propiedades ándicas bien desarrolladas debido a la nula presencia del vidrio volcánico.

**b) Difracción de Rayos X.** De acuerdo con la DRX se encontraron las siguientes fases mineralógicas (Figura 15):

| <u>Especie mineral</u> | <u>Fórmula química</u>          |
|------------------------|---------------------------------|
| Anortita               | $(Al_2 Si_2 O_8)$               |
| Cristobalita           | $(Si O_2)$                      |
| Montmorillonita        | $(Al, Mg)_2 Si_4 O_{10} (OH)_2$ |

En el difractograma se observa la presencia de cristobalita en todos los horizontes, seguida de la anortita y la montmorillonita. Las reflexiones en general son poco definidas lo que se caracteriza por una banda ancha que se encuentra constituida principalmente por materiales amorfos, los cuales son el resultado de la alteración química de los minerales primarios.

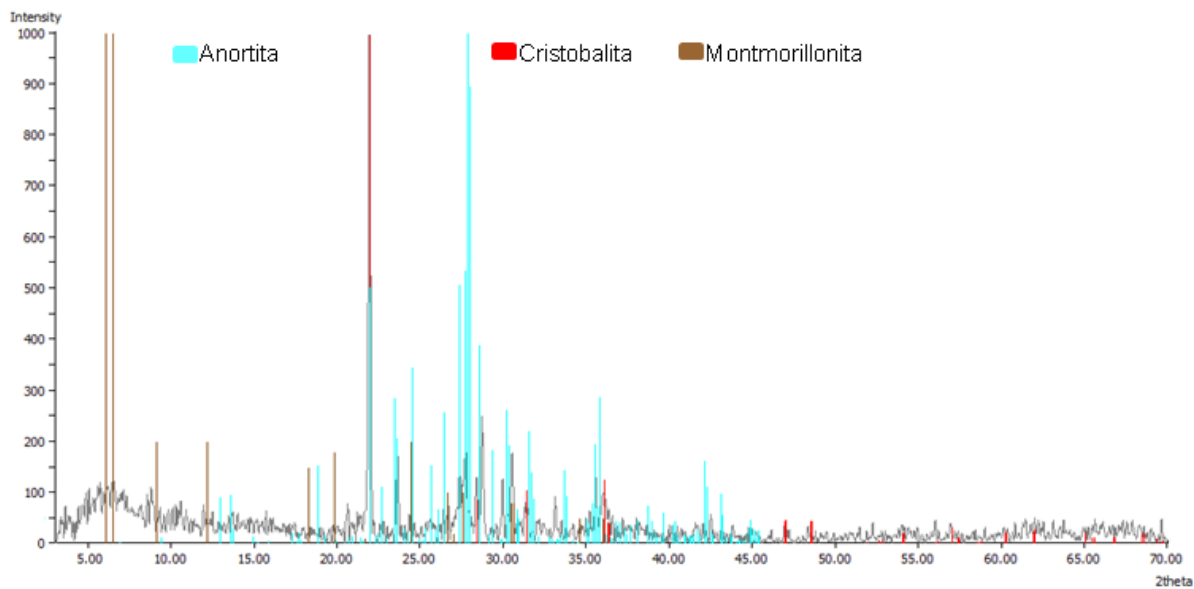


Figura 15. Diffractograma que representa los minerales primarios y secundarios del Perfil 1 (Cerro "El Cacique").

### 9.1.2. Sitio y Perfil Dos

**9.1.2.1. Descripción del sitio.** Se encuentra en el "Cerro del Campanario" en el poblado El Rosario a una altitud de 3444 m. La pendiente del terreno es de 45% y tiene una forma cóncava-convexa producto del deslizamiento. El drenaje superficial es de un sitio normal el cual, según Cuanalo (1990) corresponde a una pendiente que recibe la misma cantidad de agua de la pendiente superior que la que pierde por escurrimiento. El material de origen es una roca dacítica y cenizas volcánicas. El uso del suelo es forestal (bosque de oyamel) de cobertura densa.

**9.1.2.2. Caracterización morfológica.** El color en los primeros 83 cm es negro indicador de la humificación de materia orgánica en los horizontes A y en los horizontes C varían en color, de gris muy oscuro a pardo amarillento. En los primeros 20 cm fue notoria la presencia de carbón vegetal (Figura 16a) producto de incendios (aprox. en el año 1995),

como se muestra en una columna litológica (Figuroa, 2013) que corresponde al municipio El Rosario.

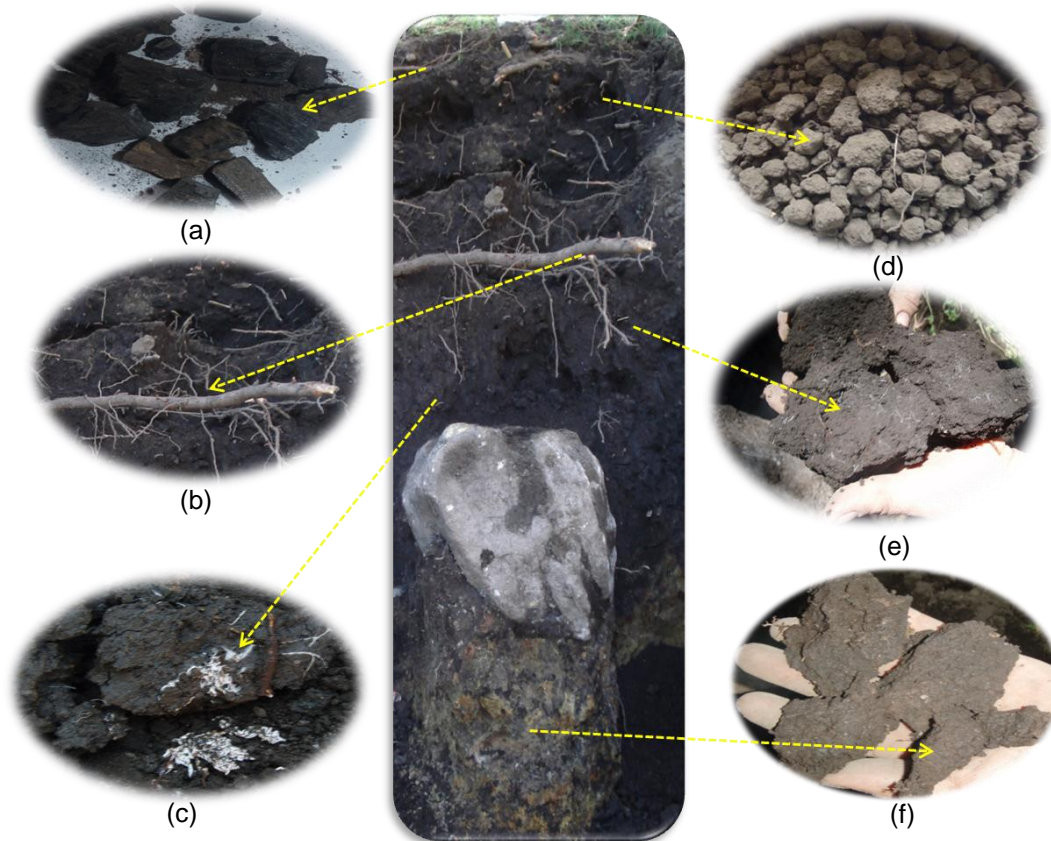


Figura 16. Morfología del Perfil 2. (a) presencia de carbón vegetal suelto; (b) raíces comunes y muy raras, gruesas y delgadas; (c) agregados con hifas agrupadas formando micelios; (d) estructura granular de moderado desarrollo; (e) estructura en bloques subangulares; (f) estructura columnar.

La presencia de raíces en los horizontes A, va de comunes a muy raras con diámetros que oscilan entre 1 y 30 mm (Figura 16b); entre los 65 y 83 cm de profundidad fue notoria la presencia de agregados con raíces (finas) oxidadas e hifas agrupadas formando micelios (Figura 16c), las cuales de acuerdo con Tisdall y Oades (1982) participan en la agregación de los suelos.

La estructura está conformada por bloques subangulares y granular de moderado desarrollo y, consistencia friable en los primeros 65 cm y a mayor profundidad cambia a columnar y bloques subangulares de moderado desarrollo y, consistencia que oscila entre débil y firme (Figuras 16d, e y f).

**9.1.2.3. Propiedades físicas y químicas.** La retención de agua a 33 y 1 500 KPa en general tendió a disminuir con la profundidad, pero mostró un incremento (55%) en el horizonte 2AC debido a que se trata de una discontinuidad litológica que consiste de una capa de ceniza volcánica con propiedades hídricas, las cuales, según Shoji *et al.* (1996) se deben a la presencia de materiales amorfos como el alófono.

La clase textural es franco limosa, el limo va de 71 a 53% conforme aumenta la profundidad, condición que permite que la permeabilidad del suelo sea moderada. La densidad aparente es menor a  $0.90 \text{ g cm}^{-3}$  en los primeros 95 cm, lo que tiene una relación directa con la alta porosidad. La MO es alta (12%) en la superficie y disminuye a muy baja (0.5%) conforme aumenta la profundidad, excepto en la capa 2AC (12.6%) que muestra una franja de cenizas volcánicas. El pH es de acidez moderada (5.6 a 6.5).

La CIC es variable de media a alta (entre 18 y  $52 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ), e irregular en todo el perfil al igual que el porcentaje de saturación de bases, el cual varía de bajo a muy alto (entre 4% y 93%) lo que puede deberse a la discontinuidad de materiales que se confirmaron con los análisis textura, pH, densidad aparente y MO, entre otros.

La retención de fosfatos es menor de 70% y tiende a disminuir con la profundidad, valores que al ser menor de 85% se descartan de las propiedades ándicas (Parfitt y Clayden, 1991).

#### 9.1.2.4. Descripción mineralógica

**a) Vidrio volcánico (V V).** En general los vidrios observados en el microscopio de luz polarizada plana presentaron un color pardo amarillento y oscuro con la luz polarizada cruzada. Los fragmentos de vidrio analizados presentaron formas semiredondeadas a subangulares en los horizontes A, mientras que los horizontes C se tornan irregulares. El porcentaje de VV es variable en relación con la profundidad, con valores que oscilan entre 2% y 29%, sin embargo los porcentajes mayores de 18% se localizan en los horizontes A, con un tamaño en promedio de 0.38 mm. La criptocristalinidad o inclusiones de otros minerales son evidentes en los bordes de la mayoría de los horizontes al presentar una anisotropía relativa. Flores *et al.* (2006) señalan que muchas veces este recubrimiento es dominante y llega a invadir totalmente el grano impidiendo su identificación.

**b) Difracción de Rayos X.** Se encontraron las siguientes fases mineralógicas (Figura 17):

| <u>Especie mineral</u> | <u>Formula química</u>             |
|------------------------|------------------------------------|
| Anortita               | $(Al_2 Si_2 O_8)$                  |
| Anortoclasa            | $(Na_{0.71} K_{0.29} Al Si_3 O_8)$ |
| Clorita                | $(Mg, Fe)_5 (Al, Si)_5 O_{10}$     |
| Cristobalita           | $(Si O_2)$                         |
| Cuarzo                 | $Si O_2$                           |
| Halosita               | $(Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4)$           |
| Montmorillonita        | $(Al, Mg)_2 Si_4 O_{10} (OH)_2$    |

El difractograma muestra fases minerales abundantes de cristobalita en todos los horizontes, seguida del cuarzo en coexistencia con la anortita, principalmente en los

horizontes A como minerales primarios, por su parte la clorita solo se observo en el horizonte A2. En lo referente a los minerales secundarios la montmorillonita fue la arcilla que se encontró en la mayoría de los horizontes, mientras que la Halloysita fue incipiente.

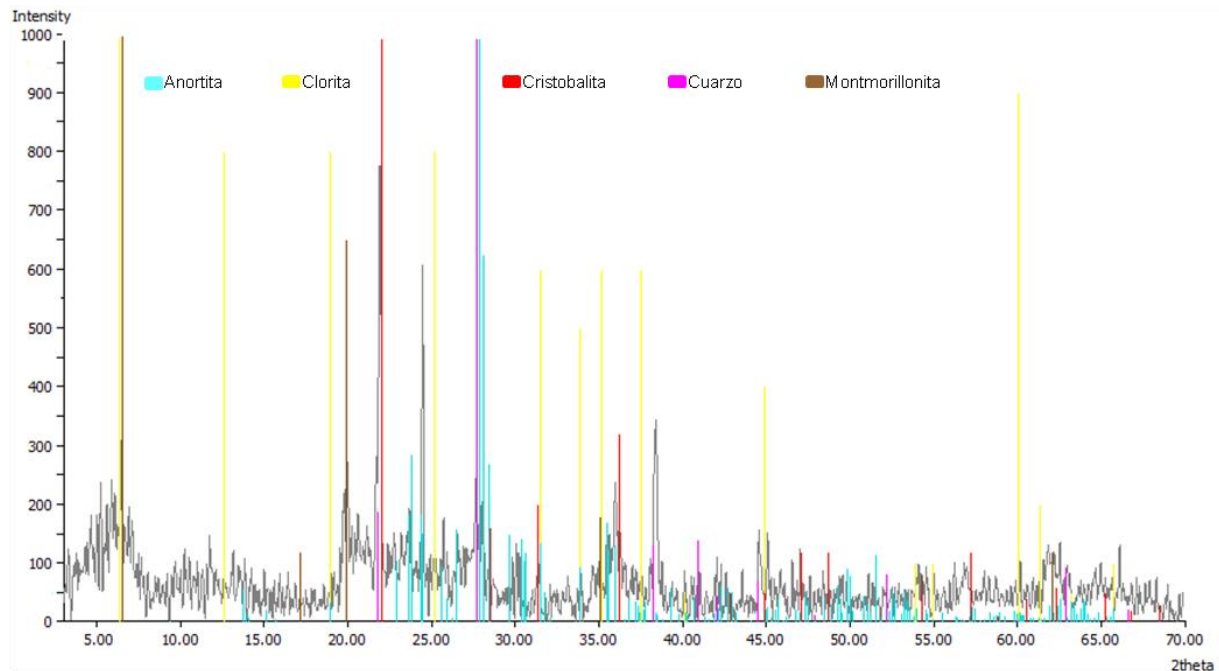


Figura 17. Difractograma que representa los minerales primarios y secundarios del Perfil 2 (Cerro "El Campanario").

### 9.1.3. Sitio y Perfil Tres

**9.1.3.1. Descripción del sitio.** Se ubica al noreste del Mpio. de Angangueo en el cerro "El Catingon" a 3368 m. La pendiente del terreno es de 45%, el drenaje superficial pertenece a un sitio normal y el microrelieve es accidentado. El material de origen es andesítico con alteración hidrotermal. El uso del suelo es forestal con una vegetación nativa de bosque de Oyamel muy alterada.

**9.1.3.2. Caracterización morfológica.** En los horizontes A existe actividad biológica y un color muy oscuro (Figura 18a) con respecto a los horizontes subyacentes como resultado

del proceso pedogenético de oscurecimiento (melanización) por la materia orgánica (Buol *et al.*, 1990). Las raíces son abundantes y contribuyen en la formación de la estructura granular de moderado desarrollo y consistencia friable (Figuras 18a y b). Al aumentar la profundidad disminuye la cantidad de raíces a raras y la estructura cambia a bloques subangulares de débil desarrollo y consistencia friable Figura 18c). En los horizontes C hay presencia de carbón (Figura 18d) asociado con incendios en el pasado.

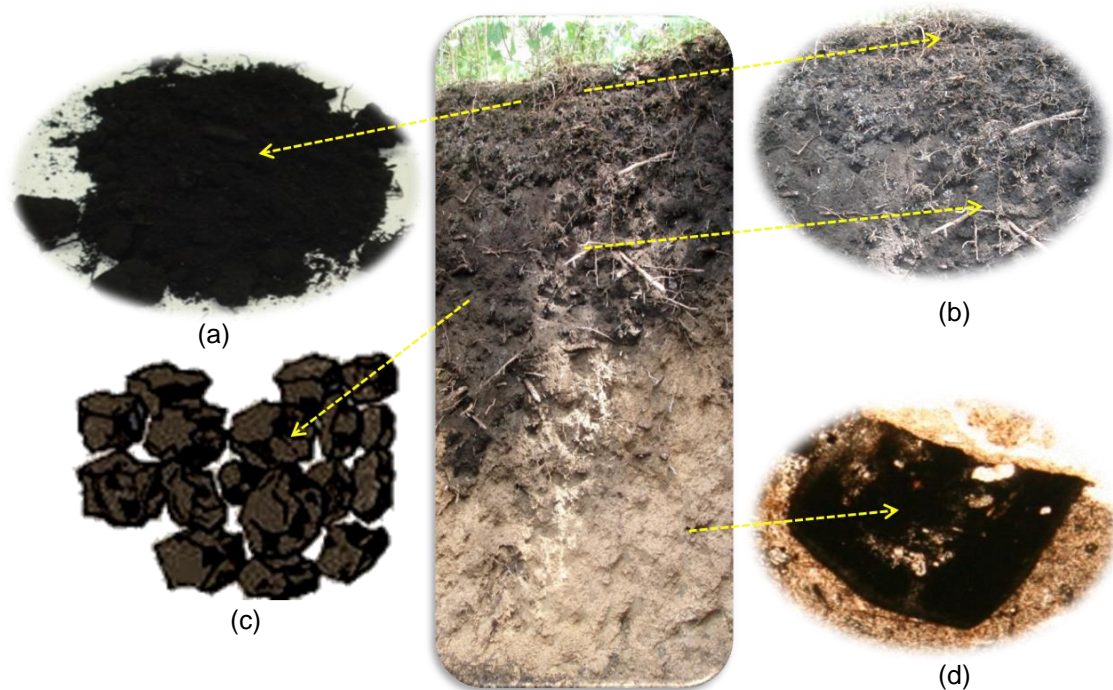


Figura 18. Morfología del Perfil 3. (a) estructura granular y color oscuro por el proceso de melanización; (b) presencia de raíces en abundante cantidad; (c) bloques subangulares de consistencia friable; (d) presencia de carbón vegetal en los horizontes C.

En los primeros 80 cm los horizontes muestran un ligero grado de tixotropía, la cual se refiere a la capacidad del suelo para cambiar a una consistencia más fluida bajo la acción de una fuerza y al desaparecer ésta, el suelo regresa a un estado más rígido (Porta *et al.*, 2003).

**9.1.3.3. Propiedades físicas y químicas.** La clase textural es franco limosa donde el porcentaje de limo (> 57%) le da untuosidad al suelo. La Dap es de  $0.60 \text{ g cm}^{-3}$  y aumenta con la profundidad a  $0.92 \text{ g cm}^{-3}$ , la cual de acuerdo con IUSS-ISRIC-FAO (2007) indica la presencia de un material alto en poros y con propiedades ándicas.

De acuerdo con la NOM (2003) la materia orgánica es muy alta (16.7%) en los primeros 23 cm y conforme aumenta la profundidad, disminuye de media (9.1%) a nula (0%).

La CIC es alta con valores que van de 22 a  $35 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ , lo cual significa que el material se está alterando y que hay presencia de materiales amorfos (Rodríguez, 1999), mismos que se confirman con un pH de 11 en NaF.

El porcentaje de saturación de bases tiende a disminuir con la profundidad de 51 a 26%, lo cual se asocia a un lavado de bases y una débil tendencia del suelo para retener cationes alcalinos (Rodríguez, 1999); entre menor sea la sumatoria de bases el pH en agua será moderadamente ácido (5.6).

#### **9.1.3.4. Descripción mineralógica**

**a) Vidrio volcánico (V V).** En los primeros 50 cm de espesor el color del vidrio fue pardo oscuro y a mayor profundidad se torna pardo amarillento con formas que van de irregulares a subangulares. Los valores de vidrio fueron muy bajos (2.5%, en promedio) con un tamaño de 0.25 mm de diámetro, esto significaría que aparentemente la mayoría de las cenizas volcánicas están alteradas. Como lo señalan Shoji *et al.* (1988) con pequeñas cantidades de vidrio se puede producir el suficiente material amorfo a partir de la liberación del Al y Fe durante el intemperismo del vidrio.

**b) Difracción de Rayos X.** Se encontraron las siguientes fases mineralógicas (Figura 19):

| <u>Especie mineral</u> | <u>Formula química</u>          |
|------------------------|---------------------------------|
| Anortita               | $(Al_2 Si_2 O_8)$               |
| Calcita                | $(Ca, Mg) C O_3$                |
| Cristobalita           | $(Si O_2)$                      |
| Halosita               | $(Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4)$        |
| Montmorillonita        | $(Al, Mg)_2 Si_4 O_{10} (OH)_2$ |

La DRX muestra la presencia de anortita, cristobalita y montmorillonita en todos los horizontes de este perfil de suelo, la calcita y la halosita solo en los horizontes A. En el difractograma se aprecia que las fases más abundantes corresponden a la cristobalita en coexistencia con la anortita y montmorillonita en coexistencia con la halosita.

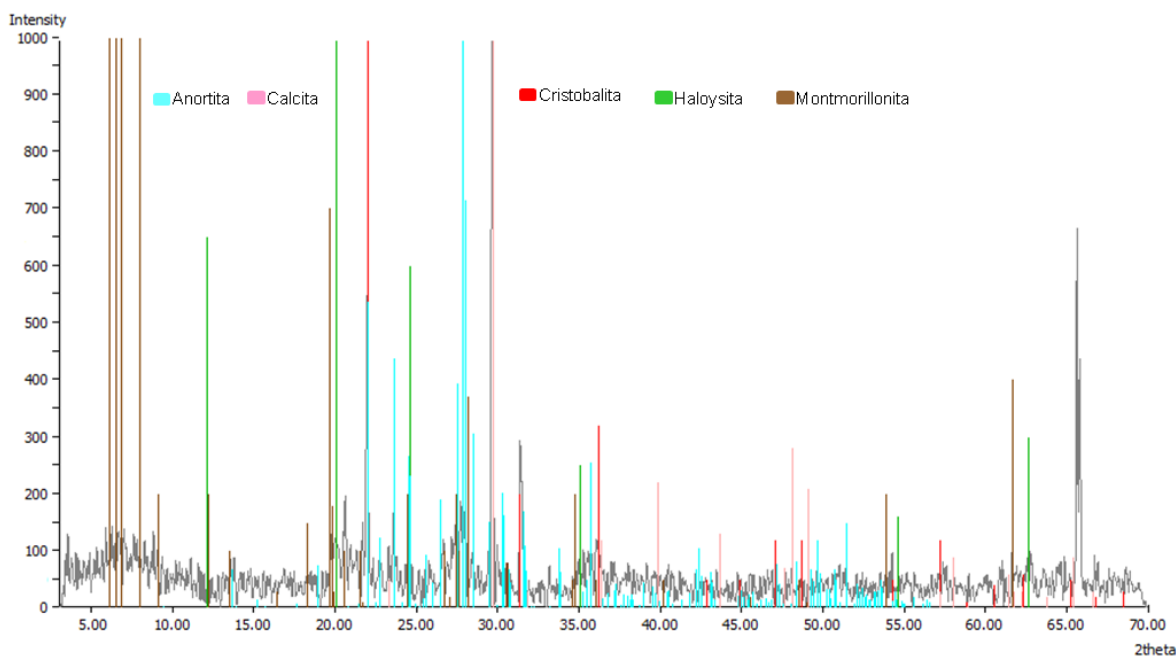


Figura 19. Difractograma que representa los minerales primarios y secundarios del Perfil 3 (Cerro “El Catingon”).

#### 9.1.4. Sitio y Perfil Cuatro

**9.1.4.1. Descripción del sitio.** Se localiza en el “Cerro Guadalupe” en Angangueo, a 2855 m. La pendiente del terreno es de 35% con microrelieve accidentado y el drenaje

superficial pertenece a un sitio donador. El material de origen es andesita con alteración hidrotermal lo que genera presencia de cuarzo en el afloramiento. La vegetación es bosque de encino-pino, matorrales y herbáceas de cobertura densa.

**9.1.4.2. Caracterización morfológica.** El horizonte A presenta estructura granular de fuerte desarrollo originada por raíces delgadas (Ibarra *et al.*, 2006) (Figura 20a y d). En la superficie hay poca actividad biológica, sin embargo, a los 15 cm hay actividad de fauna (ciempiés) (Figura 20b). Para el resto de los horizontes la estructura es de bloques subangulares (gruesos) que van de fuerte a moderado desarrollo de consistencia friable (Figura 20a).

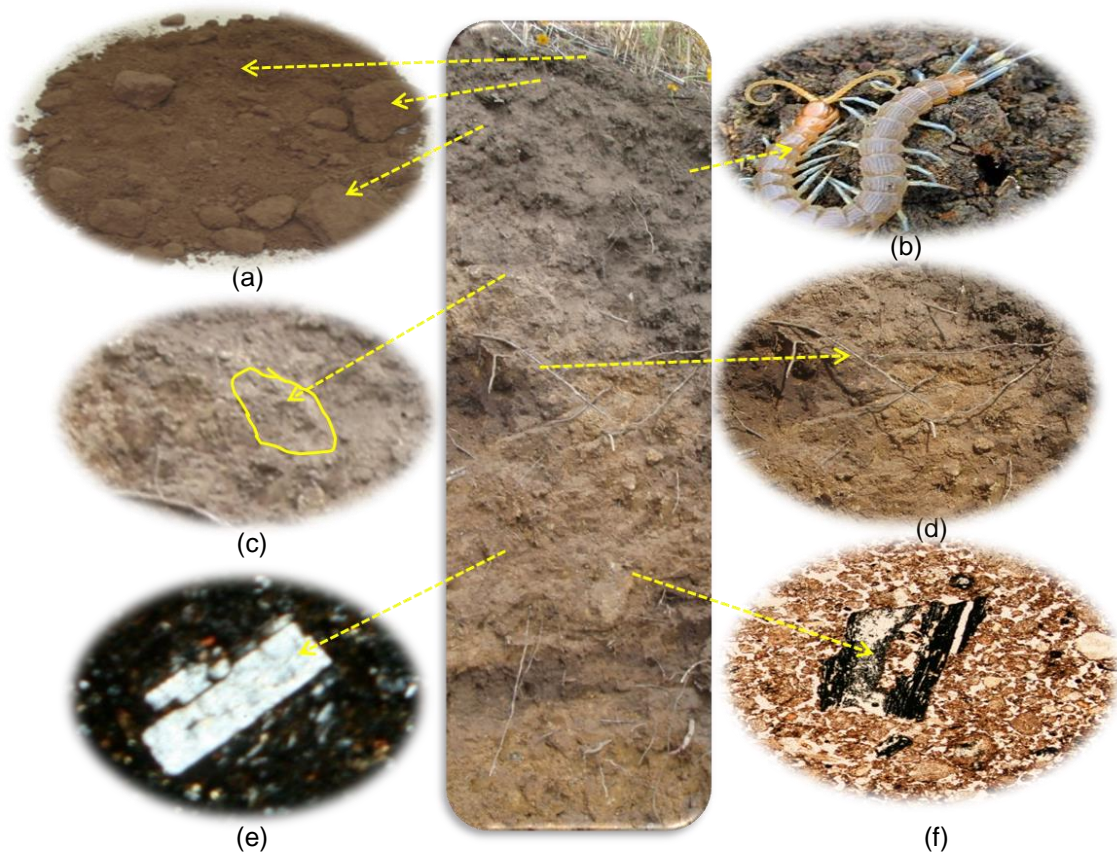


Figura 20. Morfología del Perfil 4. (a) estructura granular y de bloques subangulares de consistencia friable; (b) presencia de fauna (ciempiés); (c) pocas piedras de forma subangular; (d) pocas raíces delgadas; (e) presencia de cuarzo; (f) abundante carbón vegetal.

En general, se observan irregularidades en la distribución del color debido a la mezcla de materiales presentes en el corte de suelo debido al proceso de eluviación. El color en la superficie es café y a mayor profundidad café amarillento. En los horizontes C hay presencia de pocas piedras de forma subangular; debido al alto grado de alteración del material andesítico hay presencia de pequeños fragmentos de cuarzo que afloran y también es notable la presencia de carbón vegetal ( $\approx 1-2 \text{ mm } \Theta$ ) (Figuras 17c, e y f).

**9.1.4.3. Propiedades físicas y químicas.** La clase textural dominante es franca seguida de franco limosa las cuales se presentan en forma irregular con la profundidad. El limo domina con más de 41%.

La densidad aparente es baja ( $< 0.74 \text{ g cm}^{-3}$ ) en los primeros 41 cm y alta ( $> 1.0 \text{ g cm}^{-3}$ ) al aumentar la profundidad mostrando pequeñas irregularidades, lo que indica un material escaso en poros (Rodríguez, 1999).

Los valores de pH son moderadamente ácidos (6.2 a 6.5) conforme aumenta la profundidad, y el contenido de materia orgánica es bajo (5.8%) en el horizonte A y muy bajo en los horizontes C (1.7 a 0.7%), según la clasificación de la NOM (2003) para suelos volcánicos. La CIC es variable en todo el perfil (12 a 23  $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ) al igual que la saturación de bases (9 a 57%), los valores bajos se asocian a un lavado importante de bases.

En los horizontes A con textura franco y franco limosa se observa una retención de agua a 1500kPa menos de 15% de agua, característica de suelos con porcentajes de vidrio volcánico alto ( $>73\%$ ) según el Soil Survey Staff (2010).

#### 9.1.4.4. Descripción mineralógica

**a) Vidrio volcánico (V V).** El color que prevaleció en todo el perfil fue pardo amarillento, sin embargo, en algunos granos se presentó una coloración amarillenta tenue o muy incolora hacia los bordes debido a la inclusión de otros minerales en los granos. Shoji, *et al.* (1996) señalan que las cenizas volcánicas están dominadas por el vidrio volcánico que presenta una baja resistencia a la meteorización química y que es un constituyente de gran importancia como material parental para los suelos ándicos. En los granos se observaron valores altos (> 47%) de vidrios incoloros y coloreados con formas irregulares, siendo estos últimos los más susceptibles a meteorizarse (Flórez, *et al.*, 2006).

**b) Difracción de Rayos X.** Se encontraron las siguientes fases mineralógicas (Figura 21):

| <u>Especie mineral</u> | <u>Formula química</u>             |
|------------------------|------------------------------------|
| Anortita               | $(Al_2 Si_2 O_8)$                  |
| Anortoclasa            | $(Na_{0.71} K_{0.29} Al Si_3 O_8)$ |
| Cristobalita           | $(Si O_2)$                         |
| Cuarzo                 | $Si O_2$                           |
| Caolinita              | $Al_2 (Si_2 O_5) (OH)_4$           |
| Halloysita             | $(Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4)$           |
| Montmorillonita        | $(Al, Mg)_2 Si_4 O_{10} (OH)_2$    |

El presente difractograma revela una abundancia de la fase mineral de cristobalita y cuarzo asociados con anortita. También se pueden distinguir concentraciones de minerales secundarios como la caolinita, montmorillonita y en menor proporción halloysita.

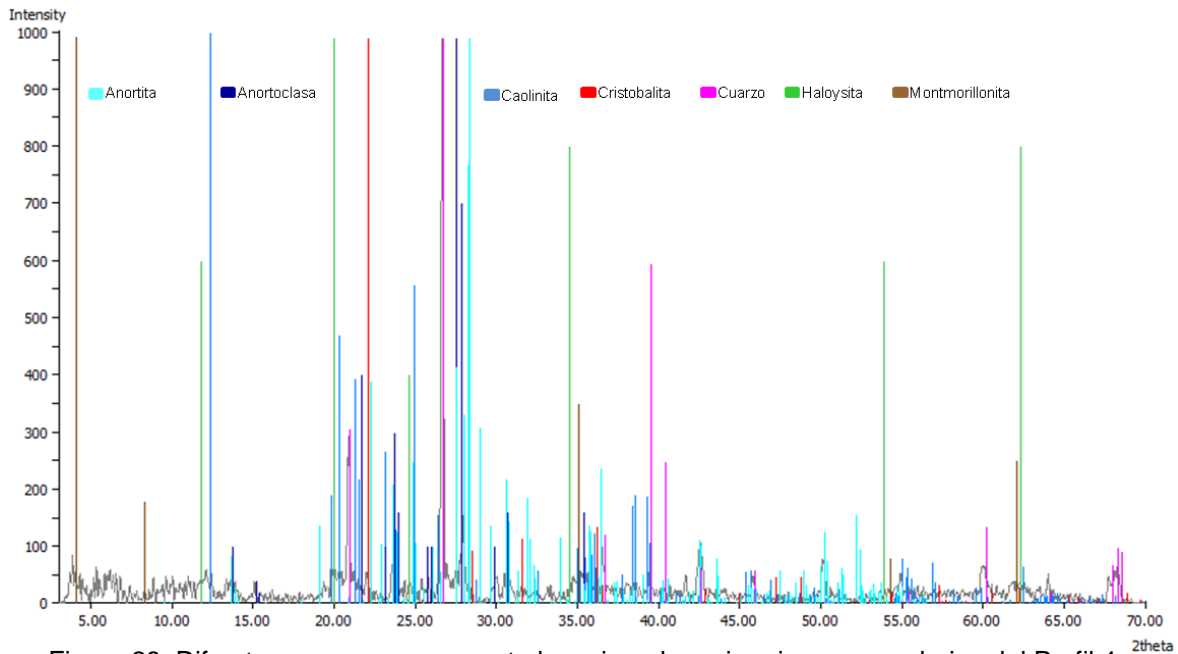


Figura 28. Diffractograma que representa los minerales primarios y secundarios del Perfil 4 (Cerro "Guadalupe").

### 9.1.5. Sitio y Perfil Cinco

**9.1.5.1. Descripción del sitio.** Se ubica en el "Cerro El Melón" en Angangueo, a 2,752 m.s.n.m. La pendiente del terreno es de 35%, el drenaje superficial pertenece a un sitio donador, y el microrelieve es accidentado con erosión severa en surcos. El material de origen es andesita muy alterada por procesos hidrotermales. En cuanto a vegetación predominan herbáceas y escasos árboles de tamaño medio a orillas del deslizamiento.

**9.1.5.2. Caracterización morfológica.** El horizonte A presenta estructura en bloques subangulares y granular de fuerte desarrollo y moderado desarrollo respectivamente (Figura 22b), de consistencia blanda originada por las raíces que se presentan de forma abundante (Ibarra *et al.*, 2006) (Figura 22a). En la superficie hay poca actividad biológica, sin embargo, a los 47 cm hay actividad de un escarabajo el cual forma canales (Figura 22c). Las capas C muestran una estructura masiva con separación de agregados

subangulares de débil desarrollo de 2 a 4 cm de  $\Theta$ , además fue notoria la presencia de carbón vegetal (Figura 22d y e).

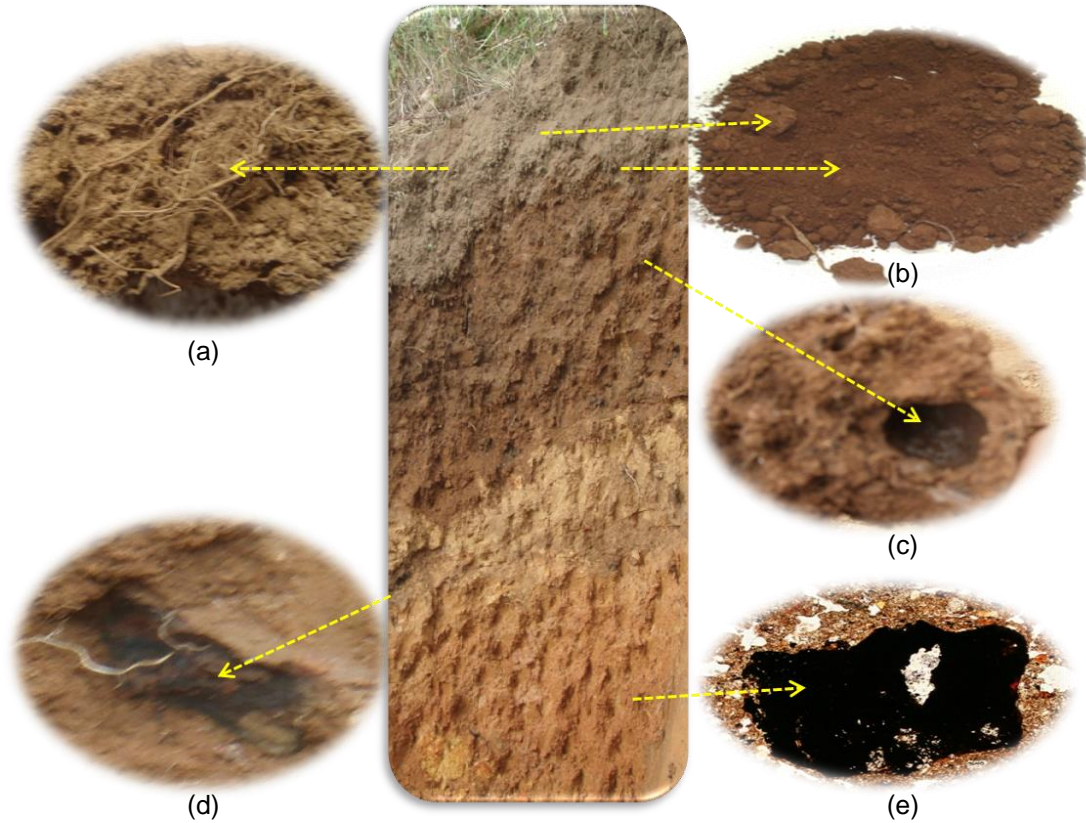


Figura 22. Morfología del Perfil 5. (a) presencia de abundantes raíces; (b) estructura granular y en bloques subangulares; (c) actividad de fauna que genera canales; (d y e) presencia de carbón vegetal.

**9.1.5.3. Propiedades físicas y químicas.** La textura va de franco a franco limoso y a mayor profundidad franco arcilloso, donde predomina la fracción limo (51%).

De acuerdo con la NOM (2003), la materia orgánica es baja (5.9%) en el horizonte A y conforme aumenta la profundidad disminuye a muy baja (1.9 a 0.7%) en forma regular. En general, la acidez del suelo es moderada (5.3 a 5.8).

La CIC es variable de baja a media (entre 12 y 26 cmol(+) kg<sup>-1</sup>) e irregular en el corte de suelo al igual que el porcentaje de saturación de bases (entre 22 y 47%) lo que puede deberse a la discontinuidad en el depósito de materiales.

#### 9.1.5.4. Descripción mineralógica

**a) Vidrio volcánico (V V).** Los granos de vidrio en los primeros 47.5 cm de espesor tienen colores amarillos con presencia de inclusiones de otros minerales no identificados en este trabajo, lo que se denota por la anisotropía localizada en los bordes con formas irregulares y subangulares. El tamaño de los granos de vidrio es de 0.32 mm de diámetro aproximadamente y presentan una abundancia baja de 8% o menos.

**b) Difracción de Rayos X.** Se encontraron las siguientes fases mineralógicas (Figura 23):

| <u>Especie mineral</u> | <u>Formula química</u>  |
|------------------------|---|
| Anortoclasa            | (Na <sub>0.71</sub> K <sub>0.29</sub> Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ) |
| Cristobalita           | (Si O <sub>2</sub> )  |
| Cuarzo                 | Si O <sub>2</sub>   |
| Caolinita              | Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (OH) <sub>4</sub>       |
| Halloysita             | (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> )       |
| Montmorillonita        | (Al, Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>   |

El difractograma al igual que en el Perfil 4, muestra que las fases de minerales dominantes son la cristobalita y cuarzo, estos en coexistencia con la anortoclasa. Las fases arcillosas que se identificaron corresponden principalmente a la montmorillonita en todos los horizontes C y la halloysita en un espesor de 47 a 65 cm de profundidad.

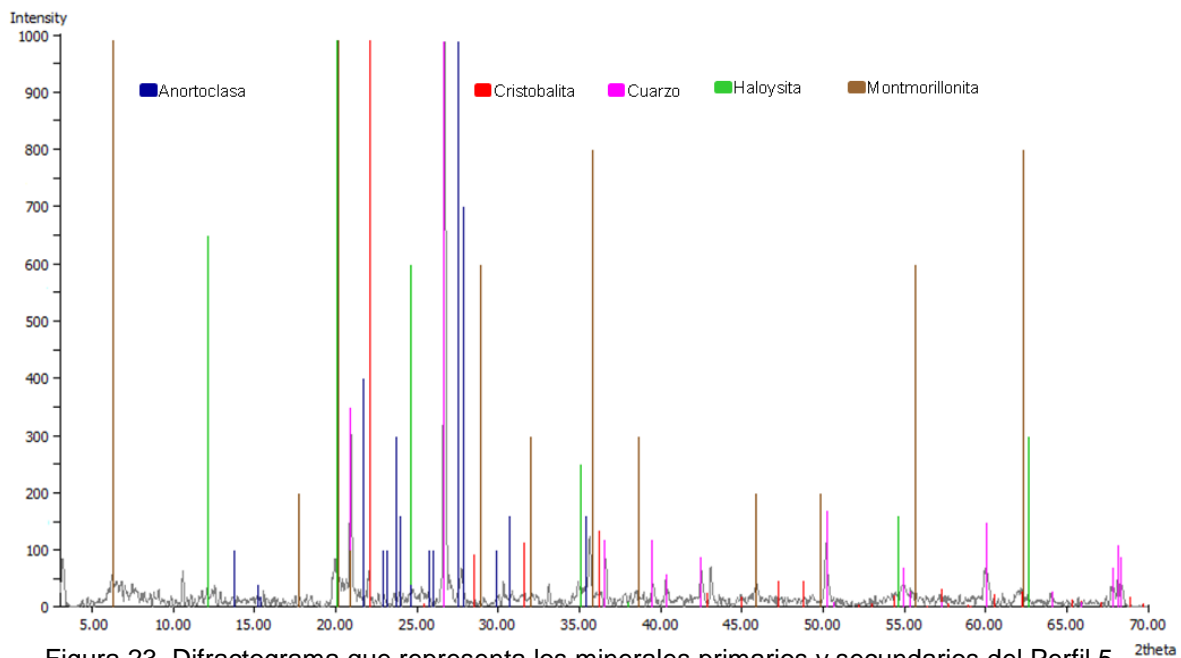


Figura 23. Diffractograma que representa los minerales primarios y secundarios del Perfil 5 (Cerro "El Melón").

## 9.2. Clasificación de suelos

### WRB: Base Referencial Mundial del Recurso Suelo: IUSS-ISRIC-FAO (2007).

Las características mediante las cuales se designó a los horizontes superficiales y a las propiedades de diagnóstico se muestran a continuación y, sus principales requerimientos se detallan en el Anexo 2.

#### 9.2.1. Horizontes de diagnóstico

En la mayoría de los suelos estudiados, los epipedones se clasificaron como úmbricos con las siguientes características: a) estructura granular y en bloques subangulares con desarrollo moderado a fuerte; b) colores oscuros con un value (luminosidad) y un chroma (intensidad) en húmedo de 2.5/1; c) saturación de bases entre 3.9% y 48.9% y; d) espesores que se localizan entre los primeros 22 y 51 cm de profundidad. El Perfil 5 al

tener un espesor de 17.5 cm se excluyó del horizonte úmbrico ya que éste requiere como mínimo un espesor de 20 cm de profundidad.

El oscurecimiento de los suelos es el producto de la degradación de la materia orgánica mezclada con el material mineral (Boul *et al.*, 1990). El color oscuro de este epipedón en los suelos estudiados está relacionado con el aporte de los residuos de la materia orgánica que soporta el suelo al encontrarse en áreas de bosque de pino-encino, oyamel y encino-pino con herbáceas de cobertura densa.

### 9.2.2. Propiedades de diagnóstico

**Ándicas.** Los Perfiles 1 y 3 cumplieron con las propiedades ándicas al presentar un valor del  $Al_o + \frac{1}{2} Fe_o$  entre 2.3% y 3.4%, una densidad aparente de 0.58 a 0.60 g cm<sup>-3</sup>, una retención de fosfatos de 91% a 95% y carbono orgánico entre 5.3% y 9.7%.

**Vítricas.** Estas propiedades se identificaron en los Perfiles 2, 4 y 5 entre los primeros 83 cm, 30 cm y 17.5 cm, respectivamente, propiedades que se expresaron mediante un porcentaje de vidrio volcánico o minerales revestidos de vidrio que va de 18% a 29% (Perfil 2), 73% a 90% (Perfil 4) y de 5% (Perfil 5), un contenido de  $Al_o + \frac{1}{2} Fe_o$  de 0.40% a 2.68%, y una retención de fosfatos de 27% a 72%.

En los suelos del Oriente de Michoacán, el vidrio volcánico (VV) se identificó en la fracción de arena con diámetro entre 0.2 a 0.63 mm el cual es un mineral que de acuerdo con sus propiedades ópticas, es de color pardo claro a oscuro en luz polarizada plana y se vuelve isotrópico (oscuro) en luz polarizada cruzada (Figura 24). Escasamente las partículas de vidrio se encontraban independientes de otros minerales, por lo general se

les identificó impregnando a otros minerales primarios (Figura 25). De acuerdo con el Soil Survey Investigations (1992) a este tipo de vidrio se le conoce como básico o sideromelane, de fácil intemperismo.

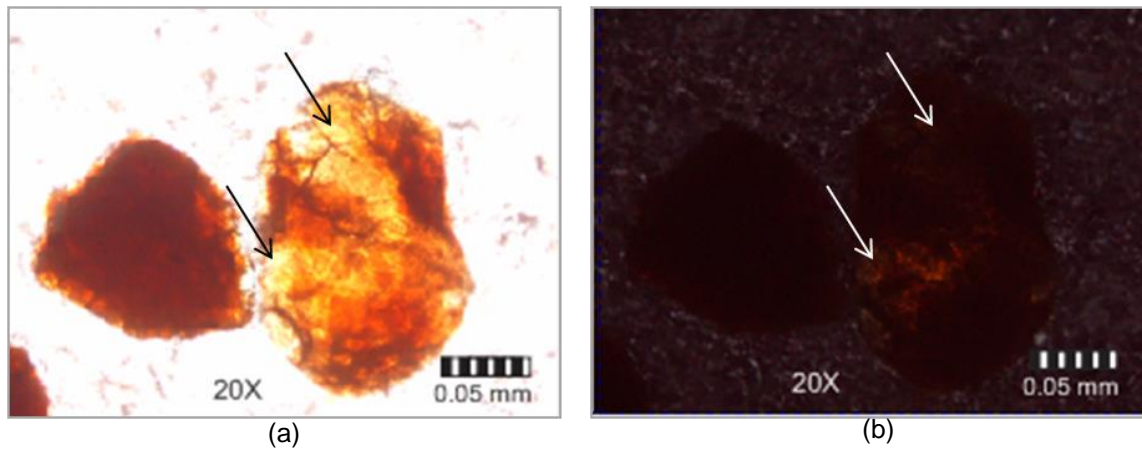


Figura 24. Vidrio volcánico: (a) luz polarizada plana y (b) luz polarizada cruzada.

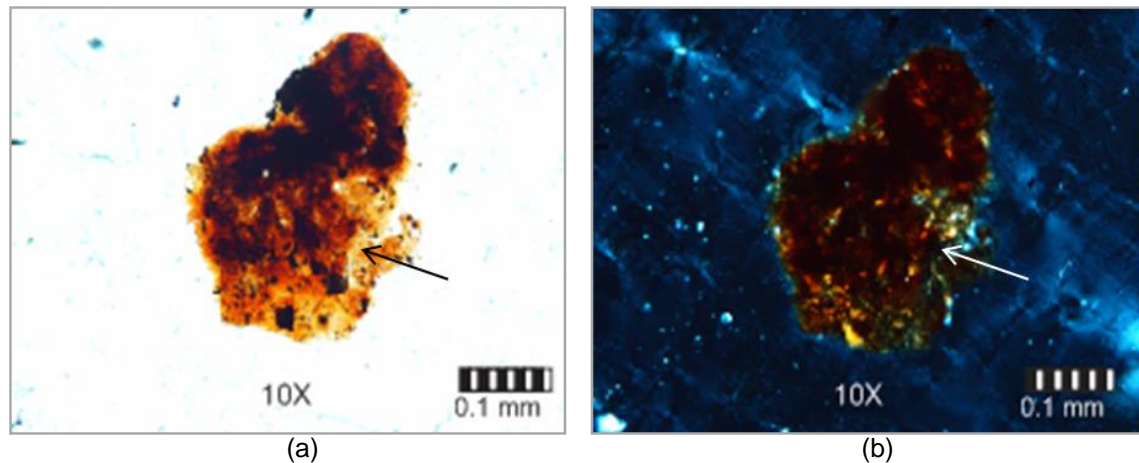


Figura 25. Vidrio volcánico que representa a los Perfiles 2 y 4 impregnando a otros minerales: (a) luz polarizada plana y (b) luz polarizada cruzada.

En los Perfiles 2, 4 y 5 el contenido de VV permitió clasificar propiedades vítricas, el alto porcentaje (73 y 90%) en los primeros 64 cm del Perfil 4 influye en la baja retención de agua de este suelo a 1500 kPa (14.4% en promedio) valor menor de 15% que la Soil

Survey Staff (2010) establece para los Andosoles vítricos; el VV en este suelo se asocian con el gran porcentaje de partículas de arena (aproximadas a 40%) que sugiere un incipiente intemperismo del material de origen, lo cual también se corrobora con la escasa formación de constituyentes amorfos ( $A_{lo}+1/2Fe$  menores de 0.5%) (Cuadro 5). En cambio, en el Perfil 2 la retención de agua a 1500 kPa es más alta (25.8% en promedio) y se refleja en que existe en promedio menor porcentaje de VV (23%), menos arena (19%) y mayor formación de amorfos ( $A_{lo}+1/2Fe$  de 2.3%). En el Perfil 5 el contenido de VV es 5% en el horizonte A, hay escasez de amorfos y retención de agua de 15%.

### 9.2.3. Grupos, unidades y calificadores de suelos

La mayoría de los suelos se clasificaron para el primer nivel jerárquico como Andosoles (Cuadro 7 y Figura 26) al cumplir con los requerimientos de las propiedades ándicas o vítricas en un espesor de 30 cm o más dentro de los primeros 100 cm de la superficie del suelo. El Perfil 5 calificó como Leptosol por ser un suelo delgado menor de 20 cm de espesor.

Cuadro 7. Clasificación de los suelos con la WRB: Base Referencial Mundial del recurso Suelo (IUSS-ISRIC-FAO, 2007).

| Perfil | espesor<br>cm | Horizonte de diagnóstico | espesor<br>cm | Propiedad de diagnóstico | Grupo    | código |
|--------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------------|----------|--------|
| 1      | 0-22          | Úmbrico                  | 0 - 110.0     | Ándica                   | Andosol  | AN     |
| 2      | 0-51          | Úmbrico                  | 0 - 83.0      | Vítrica                  | Andosol  | AN     |
| 3      | 0-23          | Úmbrico                  | 0 - 50.0      | Ándica                   | Andosol  | AN     |
| 4      | 0-30          | Úmbrico                  | 0 - 30.0      | Vítrica                  | Andosol  | AN     |
| 5      | -             | -                        | 0 - 17.5      | Vítrica                  | Leptosol | LP     |

Un resumen de los requerimientos para la clasificación de los suelos al segundo y tercer nivel jerárquico (unidades y calificadores) se presentan en el Cuadro 8 y los criterios en detalle para su clasificación se muestran en el Anexo 3.



Andosol silándico-úmbrico  
(hiperdístico, esquelético,  
límico)



Andosol vítrico-úmbrico  
(epidístico, límico)



Andosol silándico-úmbrico  
(tixotrópico, límico)



Andosol vítrico-úmbrico  
(epidístico, límico)



Leptosol vítrico  
(dístico)

Figura 26. Clasificación de los suelos estudiados al Oriente de Michoacán, de acuerdo con la WRB (2007).

Cuadro 8. Grupos, unidades y calificadores con la WRB (2007) para los suelos del Oriente de Michoacán.

| Perfil | Grupo    | unidad    | calificador   | espesor<br>cm | requerimientos del<br>calificador            | código                   |
|--------|----------|-----------|---------------|---------------|--|--------------------------|
| 1      | Andosol  | silándico |               | 0-110         | $Si_o > 0.89\%$ y<br>$AL_{py}/Al_o < 0.30\%$ | AN sn-um<br>(hd, sk, sl) |
|        |          |           | úmbrico       |               | 0-22   |                          |
|        |          |           | hiperdístrico | 0-100         | 9.4 a 26.2% de saturación de bases           |                          |
|        |          |           | esquelético   | 0-110         | Abundantes piedras y gravas                  |                          |
|        |          |           | límico        | 0-110         | Textura franco limosa                        |                          |
| 2      | Andosol  | víttrico  |               | 0-83          | Propiedades vítricas                         | AN vi-um<br>(ed, sl)     |
|        |          |           | úmbrico       |               | 0-51   |                          |
|        |          |           | epidístrico   | 20-51         | 7.7% de saturación de bases                  |                          |
|        |          |           | límico        | 0-83          | Textura franco limosa                        |                          |
| 3      | Andosol  | silándico |               | 0-50          | $AL_{py}/Al_o < 0.47\%$                      | AN sn-um<br>(tp, sl)     |
|        |          |           | úmbrico       |               | 0-23   |                          |
|        |          |           | tixotrópico   | 0-50          | Ligera tixotropía                            |                          |
|        |          |           | límico        | 0-50          | Textura franco limosa                        |                          |
| 4      | Andosol  | víttrico  |               | 0-30          | Propiedades vítricas                         | AN vi-um<br>(ed, sl)     |
|        |          |           | úmbrico       |               | 0-30   |                          |
|        |          |           | epidístrico   | 5-64          | 9.1 a 17.8% de saturación de bases           |                          |
|        |          |           | límico        | 0-30          | Textura franco y franco limosa               |                          |
| 5      | Leptosol | Víttrico  |               | 0-17.5        | Propiedades vítricas                         | LP vi (dy)               |
|        |          |           | dístrico      |               | 0-17.5                                       |                          |

#### 9.2.4. Descripción de los suelos clasificados al Oriente de Michoacán

**Andosoles** (Del japonés *an*, negro y *do*, suelo). Los andosoles del presente estudio se localizan en paisajes volcánicos en altitudes de los 2596 a 3444 m con precipitación anual que varía de 1000 a 1400 mm, humedad que permite el intemperismo del material de origen; el relieve es ondulado y montañoso con pendientes que varían de 35 a 60% con vegetación de pino-encino (Perfil 1), oyamel (Perfil 2 y 3), encino-pino (Perfil 4). A capacidad de campo (33 kPa) retienen el agua en promedio 46.9% (35.3 a 57.1%) los Perfiles 1 al 3, siendo más alta la retención en la superficie de los suelos y de 26.7% en promedio (22.7 a 32%) en el Perfil 4. Según la WRB (2007) los constituyentes amorfos en los Andosoles influyen en la retención de agua y tienen alto potencial para la producción agrícola, son fáciles de cultivar, tienen buenas propiedades de enraizamiento y

almacenamiento de agua, pero en pendientes pronunciadas se conservan mejor como bosque.

**Andosol silándico úmbrico (Perfiles 1 y 3).** Ambos suelos se caracterizan por tener un horizonte ándico. El Perfil 1 además contiene Sio extractable en oxalato ácido de amonio en más de 0.89% en 110 cm de espesor; en el Perfil 3 el Alpy/Alo es menor de 0.47% en 50 cm de espesor. Ambos suelos han desarrollado un horizonte úmbrico en los primeros 23 cm de espesor. Los Andosoles silándicos al tener una alta capacidad para retener al fósforo en más de 85% influye en la deficiencia de éste en el aprovechamiento para las plantas (Shoji *et al.*, 1996).

**Hiperdístrico, esquelético.** El Perfil 1 tienen una saturación de bases menor de 50% entre los 20 y 100 cm de espesor (9.4 a 26.2%), pero con más de 20% sólo en el horizonte A3 entre los 65 y 100 cm.

**Tixotrópico.** En el Perfil 3 se presenta el fenómeno de tixotropía, lo cual significa que al frotar al suelo entre los dedos, éste cambia del estado sólido plástico a un estado de licuefacción. La tixotropía se asocia con los constituyentes amorfos del suelo.

**Límico.** Ambos suelos tienen textura franco limosa entre los primeros 50 y 100 cm de espesor. La consistencia es friable y al frotarlo en húmedo, da una sensación suave y jabonosa.

**Andosol vítrico úmbrico (Perfiles 2 y 4).** Suelos caracterizados por un horizonte vítrico. El Perfil 2 tiene suficiente formación de amorfos (2.3%) pero que aún no se manifiestan en la retención de fosfatos (63 y 72%) que debería ser por lo menos de 85%. Tiene en promedio 23% de vidrio volcánico (V V) y retención de agua a 1500 kPa (25.8% en promedio). El Perfil 4 tiene amorfos en menos de 0.5%, V V que varía de 73 a 90% en los

primeros 64 cm de espesor y una retención de agua a 1500 kPa de 14.4% en promedio. Ambos suelos han desarrollado un horizonte úmbrico producto de la degradación de materia orgánica mezclada con el material mineral, caracterizado por presentar colores oscuros entre los 22 y 51 cm de espesor. En los Andosoles vítricos la baja capacidad de nutrimentos y de agua limitan la fertilidad de los suelos (Parfitt y Clayden, 1991).

**Epidístrico.** El Perfil 2 tienen una SB menor de 50% entre los 20 y 51 cm de espesor (7.7%). En el Perfil 4 la SB entre los 5 y 64 cm de espesor varía entre 9.1 y 17.8%.

**Límico.** Ambos suelos tienen textura franco limosa en los primeros 50 y 100 cm de espesor.

**Leptosol vítrico (Suelo somero, del griego *leptos*, fino) (Perfil 5).** El Leptosol es un suelo delgado limitado por roca intemperizada a los 17.5 cm de espesor en donde presenta propiedades vítricas. Se localiza en un paisaje volcánico a una altitud de 2752 m con precipitación anual de 1200 a 1400 mm en una ladera de loma con pendiente de 35% y corresponde a una parcela agrícola en descanso. Su capacidad de retención de agua a 33 kPa en promedio es 29.9%. Las condiciones topográficas, el cambio de uso del suelo y escasa vegetación que prevalecen en la zona, influyen en su degradación.

**Dístrico.** Tiene una saturación de bases menor de 50% (22.2%) en todo su espesor.

### **9.2.5. Clasificación de suelos con la WRB (2007) y con la Leyenda Original del Mapa Mundial de Suelos (1970).**

Los suelos del Oriente de Michoacán fueron clasificados al primer nivel jerárquico (Grupo) con la Base de referencia Mundial del Recurso Suelo (WRB) (IUSS-ISRIC-FAO, 2007) como Andosoles (Perfiles 1 al 4), lo cual coincide con lo reportado por el INEGI (1982) también al primer nivel (Unidad) clasificados con la Leyenda original del Mapa Mundial de Suelos (FAO-UNESCO, 1970). En el caso del Perfil 5, el INEGI reporta Andosol, mientras que en el presente trabajo, se clasificó como Leptosol.

Es importante señalar que en el presente estudio se muestran los análisis físicos y químicos de los suelos para clasificar a los Andosoles, mientras que en las cartas edafológicas del INEGI se carece de dicha información con excepción de la densidad aparente. El INEGI para clasificar a los suelos utilizó la Leyenda del Mapa Mundial de Suelos (FAO-UNESCO, 1970) cuyos requisitos fueron la densidad aparente y un complejo de intercambio dominado por constituyentes amorfos ó 60% ó más de vidrio volcánico en el suelo, información que no se da a conocer en las cartas antes mencionadas. Mediante la clasificación de los diferentes niveles en la jerarquía de los sistemas de clasificación (Grupos, unidades y calificadores con la WRB) se identifican gran cantidad de propiedades físicas y químicas de suelos importantes para la toma de decisiones.

### 9.3. Propiedades edáficas relacionadas con la estabilidad de agregados

**9.3.1. Textura.** De acuerdo con la información presentada en el Cuadro 5 y 9, la clase textural para la mayoría de los suelos es franco limosa con excepción de algunos horizontes (Cuadro 5) que se caracterizan por presentar en orden de mayor a menor, porcentajes altos de partículas de limo, arena y arcilla. El limo es la fracción que domina en la textura de los Andosoles (Yamada *et al.*, 1975) y debido al alto contenido de limo y la proporción de arena que contienen, la consistencia de estos suelos es friable en húmedo y blanda o suelta en seco, es decir, los agregados del suelo se destruyen con facilidad al ejercer una ligera presión sobre ellos.

Cuadro 9. Promedio de porcentajes de las partículas del suelo.

| Perfiles de suelo | Espesor<br>cm | Textura |           |         | Clase         |
|-------------------|---------------|---------|-----------|---------|---------------|
|                   |               | Arena   | Limo<br>% | Arcilla |               |
| 1                 | 170           | 34.0    | 59.4      | 6.7     | Franco limosa |
| 2                 | 190           | 21.7    | 62.6      | 15.7    | Franco limosa |
| 3                 | 125           | 23.8    | 62.6      | 13.7    | Franco limosa |
| 4                 | 130           | 36.6    | 47.3      | 16.2    | Franco limosa |
| 5                 | 97.5          | 25.8    | 49.7      | 24.5    | Franco limosa |

La textura franco limosa le da untuosidad al suelo, debido a la presencia de constituyentes amorfos que presentan estos suelos como producto del intemperismo del material que les da origen e influye en su alta capacidad de retención de agua durante el año, aunado a esto, las arenas contribuyen en una buena permeabilidad, sin embargo, los suelos ricos en partículas de limo, al presentar un potencial iónico reducido, la agregación del suelo es desfavorable y difícil de lograr estabilidad estructural (Montenegro, 1991; Narro, 1994; Porta *et al.*, 2003).

En el caso de las arcillas, los porcentajes son relativamente bajos, lo cual muestra una incipiente formación de minerales secundarios, contenidos que coinciden con lo indicado por FitzPatrick quien señala que en Andosoles la fracción arcilla es menor de 25%, no obstante a esto, las arcillas, especialmente las expandibles tienen un alto potencial iónico y dan respuesta a la resistencia de los agregados, debido a las fuerzas cohesivas que provienen de sus enlaces químicos (Narro, 1994; Figueroa *et al.*, 1991).

En la Figura 27 se muestra que las fracciones arena aumentan de manera regular con la profundidad del suelo, excepto en los Perfiles 4 y 5, y el limo aumenta y disminuye con la profundidad, lo cual puede deberse a la discontinuidad de materiales, debido a que en la zona de estudio existe movimiento coluvial de materiales. En cambio, la arcilla muestra una tendencia a incrementar con la profundidad del suelo con excepción de algunos horizontes. Se aprecia que el Perfil 1 es el de menor cantidad de arcillas así como el horizonte localizado de 117 a 144 cm de profundidad del Perfil 2 y del Perfil 5 (47.5 a 65 cm) o a la incipiente formación de ésta.

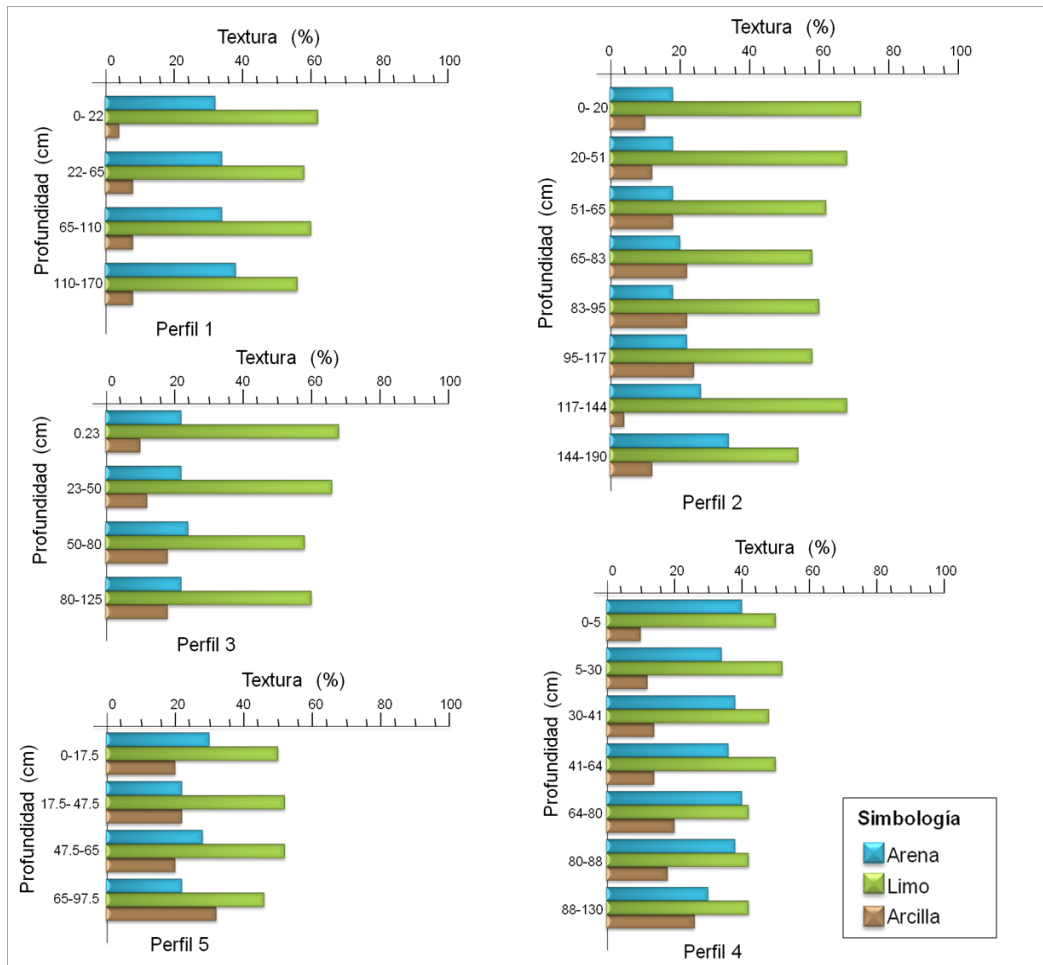


Figura 27. Porcentajes de arena, limo y arcilla en relación con la profundidad de los suelos.

### 9.3.2. Materia orgánica

Los contenidos de MO en promedio son altos en los primeros 30 cm de espesor (15%) en los Perfiles 1, 2 y 3, y de 5.8% en los Perfiles 4 y 5, porcentajes que disminuyen con la profundidad de los suelos de manera regular de valores medios a muy bajos (9.0 a 0.25%), excepto en el Perfil 1 en donde el contenido se mantuvo por encima de 9.5% y en el Perfil 2 (de 117 a 144 cm), la MO fue alta, caso que puede deberse a que éste sea un horizonte enterrado. En los Perfiles 4 y 5, la MO también disminuyó con la profundidad de contenidos bajos a muy bajos (5.8 a 1.4%) (Figura 28).

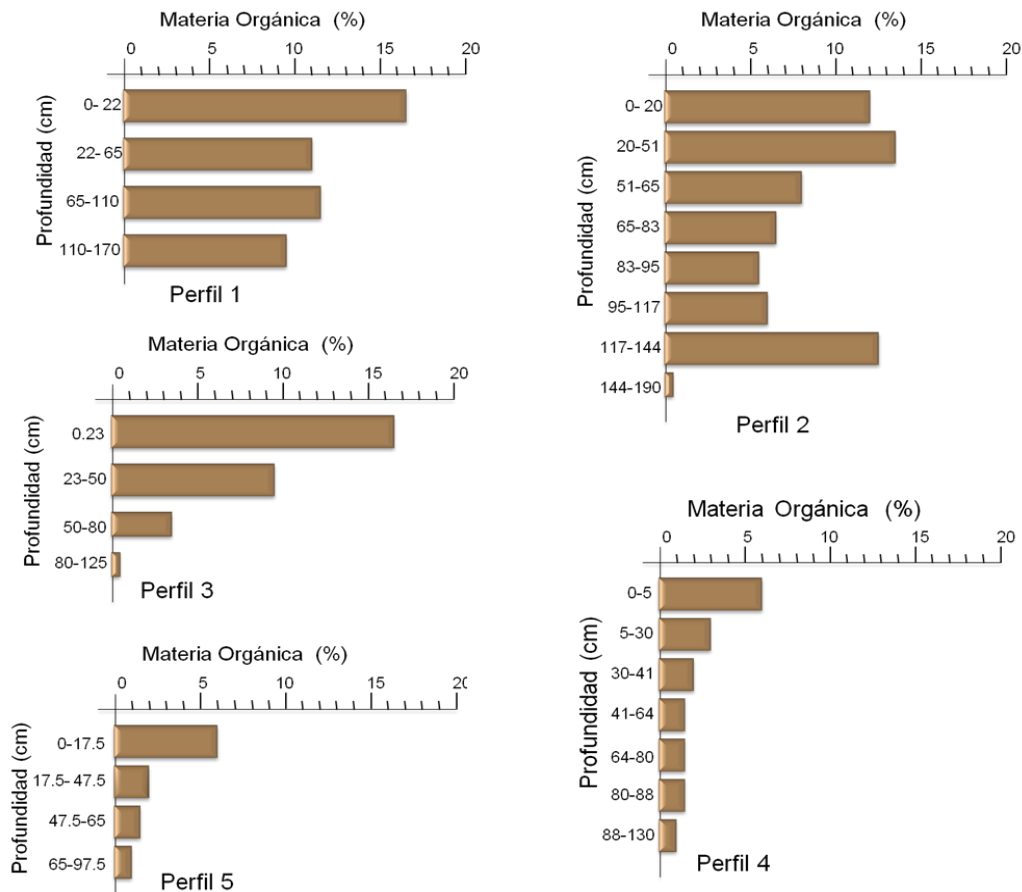


Figura 28. Porcentajes de materia orgánica en relación con la profundidad de los suelos.

En los Perfiles 1, 2 y 3 el aporte de MO es de pino-encino en el primero y de oyamel en los demás. Los Perfiles 4 y 5 presentan los valores más bajos de MO, en el primero hay menor cubierta vegetal y la que existe es de encino, y el segundo es de uso agrícola, en éstos dos últimos suelos, la MO pudo haberse perdido por erosión o por incendios, en el caso del agrícola, por el uso que se le dio, ya que actualmente está en descanso y sin protección. De acuerdo con Brady (1984) en la superficie de los suelos de pastizal el porcentaje de MO es más alto que los forestales, sin embargo, en los Perfiles 1, 2 y 3 de los suelos estudiados, la MO fue muy alta en la superficie, ya que son áreas forestales que contribuyen con las hojarasca que se descompone y se transforma en humus adicionándose al suelo.

La MO en la superficie de los suelos estudiados son más altos que en los horizontes subsuperficiales. Se ha encontrado una alta correlación entre la MO y la agregación del suelo (Hermawan y Bomke, 1997), por lo que el humus como producto de la transformación de la MO es uno de los principales agentes cementantes que participan en la formación y estabilidad de los agregados (Porta *et al.*, 2003; Montenegro, 1991), sin embargo, una vez que éstos están expuestos al agua se desestabilizan (Tisdall y Oades, 1982).

### 9.3.3. Constituyentes amorfos

Los porcentajes de Al, Fe y Si con oxalato, ditionito citrato bicarbonato y pirofosfato extraídos mediante el análisis por disolución selectiva se muestran en el Cuadro 10, datos que sirvieron de base para estimar la presencia y tipo de los constituyentes amorfos presentados en el Cuadro 11.

**9.3.3.1. Alófono.** De acuerdo con los criterios definidos por Parfitt y Clayden (1991) se determinó la presencia de constituyentes amorfos en los suelos estudiados mediante la relación  $Al_0 + \frac{1}{2} Fe_0$  ( $\geq 2.0\%$ ). Los valores variaron de 2.25% a 5.91%. En promedio, en los suelos estudiados, el porcentaje de  $Al_0$  fue de 3.97 a 0.7%, valores más altos que los del  $Al_d$  (0.85 a 0.034%) (Figura 29a), esto significa que el  $Al_0$  forma parte principalmente de los constituyentes amorfos como el alofano e imogolita producto del intemperismo de las cenizas volcánicas (Mizota y van Reeuwijk, 1989). En el proceso de disolución selectiva, Wada (1977) señala que el oxalato de amonio ácido extrae el Al que forma parte del alofano y el Fe de la ferrihidrita, en cambio, el ditionito citrato bicarbonato extrae al Al y Fe correspondiente a los complejos de humus-Al y humus-Fe. En los horizontes C de los Perfiles 2, 3 (80-125 cm), 4 y 5 el contenido de Al es menor a 0.9% que sugiere

una incipiente formación de amorfos. En los Andosoles, a los constituyentes amorfos alófano e imogolita (Parfitt y Clayden, 1991) se les atribuye la estabilidad de los agregados (Barreal *et al.*, 2001; Schwertmann y Taylor, 1989).

Cuadro 10. Al, Fe y Si extraídos mediante el análisis químico por disolución selectiva en la fracción de tierra fina de los suelos estudiados.

| Perfil y horizonte | Espesor<br>Cm | OXA  |      |      | Ald  | DCB<br>Fed | Sid  | PIR  |      |
|--------------------|---------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|
|                    |               | Alo  | Feo  | Sio  |      |            |      | Alp  | Fep  |
|                    |               | -    | -    | -    | %    | -          | -    | -    | -    |
| Perfil 1           |               |      |      |      |      |            |      |      |      |
| A                  | 0-22          | 3.27 | 0.31 | 0.89 | 1.12 | 0.15       | 0.07 | 1.00 | 0.24 |
| A2                 | 22-65         | 4.17 | 0.40 | 1.86 | 0.88 | 0.11       | 0.20 | 0.90 | 0.16 |
| A3                 | 65-110        | 4.40 | 0.36 | 2.30 | 0.75 | 0.09       | 0.08 | 0.63 | 0.09 |
| C                  | 110-170       | 4.04 | 0.31 | 1.83 | 0.66 | 0.08       | 0.05 | 0.70 | 0.05 |
| Perfil 2           |               |      |      |      |      |            |      |      |      |
| A                  | 0-20          | 1.90 | 0.77 | 0.29 | 0.82 | 0.25       | 0.07 | 0.81 | 0.46 |
| A2                 | 20-51         | 2.05 | 0.75 | 0.30 | 0.58 | 0.23       | 0.07 | 0.54 | 0.44 |
| A3                 | 51-65         | 2.26 | 0.85 | 0.32 | 0.55 | 0.28       | 0.10 | 0.70 | 0.57 |
| AC                 | 65-83         | 1.55 | 0.71 | 0.22 | 0.54 | 0.31       | 0.11 | 0.62 | 0.60 |
| C                  | 83-95         | 0.95 | 0.60 | 0.07 | 0.28 | 0.23       | 0.04 | 0.53 | 0.50 |
| C2                 | 95-117        | 0.42 | 0.50 | 0.01 | 0.11 | 0.12       | 0.03 | 0.27 | 0.24 |
| 2AC                | 117-144       | 4.86 | 2.10 | 1.80 | 2.48 | 0.68       | 0.08 | 1.99 | 1.39 |
| C                  | 144-190       | 0.27 | 0.25 | 0.00 | 0.02 | 0.03       | 0.06 | 0.03 | 0.05 |
| Perfil 3           |               |      |      |      |      |            |      |      |      |
| A                  | 0-23          | 1.96 | 0.73 | 0.38 | 1.20 | 0.26       | 0.13 | 1.03 | 0.47 |
| A2                 | 23-50         | 2.78 | 0.80 | 0.75 | 1.16 | 0.29       | 0.11 | 1.06 | 0.47 |
| C                  | 50-80         | 1.97 | 0.55 | 0.55 | 0.74 | 0.20       | 0.07 | 0.43 | 0.29 |
| C2                 | 80-125        | 0.73 | 0.35 | 0.14 | 0.26 | 0.11       | 0.03 | 0.10 | 0.16 |
| Perfil 4           |               |      |      |      |      |            |      |      |      |
| A                  | 0-5           | 0.22 | 0.33 | 0.07 | 0.06 | 0.10       | 0.03 | 0.16 | 0.10 |
| A2                 | 5-30          | 0.32 | 0.40 | 0.05 | 0.05 | 0.11       | 0.03 | 0.16 | 0.11 |
| C                  | 30-41         | 0.20 | 0.33 | 0.04 | 0.02 | 0.08       | 0.02 | 0.21 | 0.07 |
| C2                 | 41-64         | 0.09 | 0.23 | 0.02 | 0.03 | 0.04       | 0.03 | 0.19 | 0.06 |
| C3                 | 64-80         | 0.31 | 0.22 | 0.02 | 0.01 | 0.02       | 0.04 | 0.06 | 0.05 |
| C4                 | 80-88         | 0.30 | 0.24 | 0.02 | 0.00 | 0.05       | 0.04 | 0.01 | 0.06 |
| C5                 | 88-130        | 0.15 | 0.18 | 0.02 | 0.01 | 0.03       | 0.04 | 0.09 | 0.03 |
| Perfil 5           |               |      |      |      |      |            |      |      |      |
| A                  | 0-17.5        | 0.69 | 0.48 | 0.11 | 0.41 | 0.15       | 0.04 | 0.28 | 0.21 |
| C                  | 17.5-47.5     | 0.66 | 0.46 | 0.11 | 0.29 | 0.14       | 0.04 | 0.11 | 0.15 |
| 2C                 | 47.5-65       | 0.12 | 0.19 | 0.02 | 0.05 | 0.03       | 0.06 | 0.08 | 0.05 |
| 3C                 | 65-97.5       | 0.15 | 0.18 | 0.02 | 0.03 | 0.02       | 0.03 | 0.07 | 0.03 |

Alo, Feo y Sio = aluminio, hierro y silicio extraídos con oxalato ácido (OXA); Ald, Fed y Sid = extraídos con ditionito citrato bicarbonato (DCB); Alp y Fep = extraídos con pirofosfato de sodio (PIR).

Cuadro 11. Relaciones que indican la presencia y porcentaje de minerales amorfos en los perfiles de suelo estudiados.

| Perfil y horizonte | Espesor<br>Cm | Alo +<br>1/2Feo | Sio<br>Alo | Alp<br>Ald | Fep<br>Fed | Feo<br>Fed | ALO+IMO | ALO   | IMO  | FER  |
|--------------------|---------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|---------|-------|------|------|
|                    |               | -               | -          | -          | %          |            | -       | -     |      | -    |
| Perfil 1           |               |                 |            |            |            |            |         |       |      |      |
| A                  | 0-22          | 3.42            | 0.27       | 0.90       | 1.58       | 2.04       | 7.10    | 10.40 | 0.00 | 0.53 |
| A2                 | 22-65         | 4.37            | 0.45       | 1.02       | 1.41       | 3.56       | 14.88   | 14.43 | 0.45 | 0.68 |
| A3                 | 65-110        | 4.59            | 0.52       | 0.85       | 1.01       | 4.18       | 18.40   | 15.04 | 3.36 | 0.62 |
| C                  | 110-170       | 4.20            | 0.45       | 1.07       | 0.73       | 4.13       | 14.64   | 14.09 | 0.55 | 0.53 |
| Perfil 2           |               |                 |            |            |            |            |         |       |      |      |
| A                  | 0-20          | 2.28            | 0.15       | 0.99       | 1.89       | 3.11       | 2.30    | 4.14  | 0.00 | 1.30 |
| A2                 | 20-51         | 2.42            | 0.15       | 0.94       | 1.90       | 3.21       | 2.38    | 0.00  | 2.38 | 1.27 |
| A3                 | 51-65         | 2.68            | 0.14       | 1.27       | 2.02       | 3.01       | 2.58    | 0.00  | 2.58 | 1.45 |
| AC                 | 65-83         | 1.91            | 0.14       | 1.15       | 1.96       | 2.34       | 1.74    | 0.00  | 1.74 | 1.21 |
| C                  | 83-95         | 1.25            | 0.07       | 1.88       | 2.17       | 2.63       | 0.54    | 0.00  | 0.54 | 1.03 |
| C2                 | 95-117        | 0.67            | 0.03       | 2.46       | 1.98       | 4.14       | 0.10    | 0.00  | 0.10 | 0.84 |
| 2AC                | 117-144       | 5.91            | 0.37       | 0.80       | 2.06       | 3.12       | 14.40   | 15.27 | 0.00 | 3.58 |
| C                  | 144-190       | 0.39            | 0.01       | 1.43       | 1.94       | 9.72       | 0.02    | 0.00  | 0.02 | 0.42 |
| Perfil 3           |               |                 |            |            |            |            |         |       |      |      |
| A                  | 0-23          | 2.33            | 0.19       | 0.86       | 1.78       | 2.78       | 3.02    | 10.75 | 0.00 | 1.24 |
| A2                 | 23-50         | 3.18            | 0.27       | 0.91       | 1.63       | 2.79       | 6.00    | 11.74 | 0.00 | 1.36 |
| C                  | 50-80         | 2.25            | 0.28       | 0.58       | 1.44       | 2.76       | 4.38    | 9.00  | 0.00 | 0.93 |
| C2                 | 80-125        | 0.90            | 0.19       | 0.38       | 1.49       | 3.17       | 1.10    | 0.07  | 1.03 | 0.60 |
| Perfil 4           |               |                 |            |            |            |            |         |       |      |      |
| A                  | 0-5           | 0.38            | 0.33       | 2.58       | 1.00       | 3.44       | 0.58    | 19.25 | 0.00 | 0.56 |
| A2                 | 5-30          | 0.52            | 0.17       | 3.01       | 1.00       | 3.79       | 0.42    | 8.05  | 0.00 | 0.68 |
| C                  | 30-41         | 0.36            | 0.18       | 11.58      | 0.91       | 4.29       | 0.28    | 23.40 | 0.00 | 0.56 |
| C2                 | 41-64         | 0.21            | 0.24       | 6.76       | 1.59       | 5.94       | 0.18    | 23.40 | 0.00 | 0.39 |
| C3                 | 64-80         | 0.42            | 0.05       | 9.17       | 2.04       | 9.71       | 0.12    | 0.00  | 0.12 | 0.37 |
| C4                 | 80-88         | 0.42            | 0.07       | 0.00       | 1.16       | 5.02       | 0.16    | 0.00  | 0.16 | 0.40 |
| C5                 | 88-130        | 0.24            | 0.12       | 6.28       | 0.89       | 6.10       | 0.14    | 6.06  | 0.00 | 0.31 |
| Perfil 5           |               |                 |            |            |            |            |         |       |      |      |
| A                  | 0-17.5        | 0.93            | 0.16       | 0.69       | 1.36       | 3.15       | 0.90    | 4.77  | 0.00 | 0.81 |
| C                  | 17.5-47.5     | 0.89            | 0.17       | 0.37       | 1.02       | 3.20       | 0.88    | 0.00  | 0.88 | 0.78 |
| 2C                 | 47.5-65       | 0.21            | 0.15       | 1.48       | 2.14       | 7.41       | 0.14    | 11.31 | 0.00 | 0.32 |
| 3C                 | 65-97.5       | 0.24            | 0.14       | 2.79       | 1.48       | 10.11      | 0.16    | 4.91  | 0.00 | 0.31 |

Alo, Feo, Sio; Ald, Fed; Alp, Fep = aluminio, hierro y silicio extraídos con OXA; DCB; PIR, respectivamente; ALO = alofano; IMO = imogolita; FER = ferrihidrita.

**9.3.3.2. Imogolita.** Los resultados obtenidos para la relación Sio/Alo cercanos a 0.5 indican la presencia de imogolita (Parfitt *et al.*, 1984; Wada, 1989) solamente en el Perfil 1 (0.45 a 0.52) con excepción del primer horizonte, lo cual se corrobora con los porcentajes de imogolita (IMO) mostrados en el Cuadro 10 para los mismos horizontes del Perfil 1 y de 20 a 83 cm en el Perfil 2 así como valores más bajos en varios horizontes de los

demás suelos. La cantidad de imogolita se encuentra en menor cantidad y en menos horizontes que el alofano con excepción del Perfil 2 (20 a 83 cm) en donde hay ausencia de éste último, pero en cuanto a la imogolita se registraron valores altos (1.74 a 2.38%). El alofano y la imogolita se encuentran juntos dada su composición química similar (Farmer *et al.*, 1980).

**9.3.3.3. Ferrihidrita.** El porcentaje de Feo varió de 0.18 a 0.85, estos valores son más altos que los del Fed (0.02 a 0.29), lo cual sugiere que el Feo forma parte de constituyentes amorfos del tipo de la ferrihidrita (Mizota y van Reeuwijk, 1989) (Figura 29b), la cual varía de 0.047% a 1.4%.

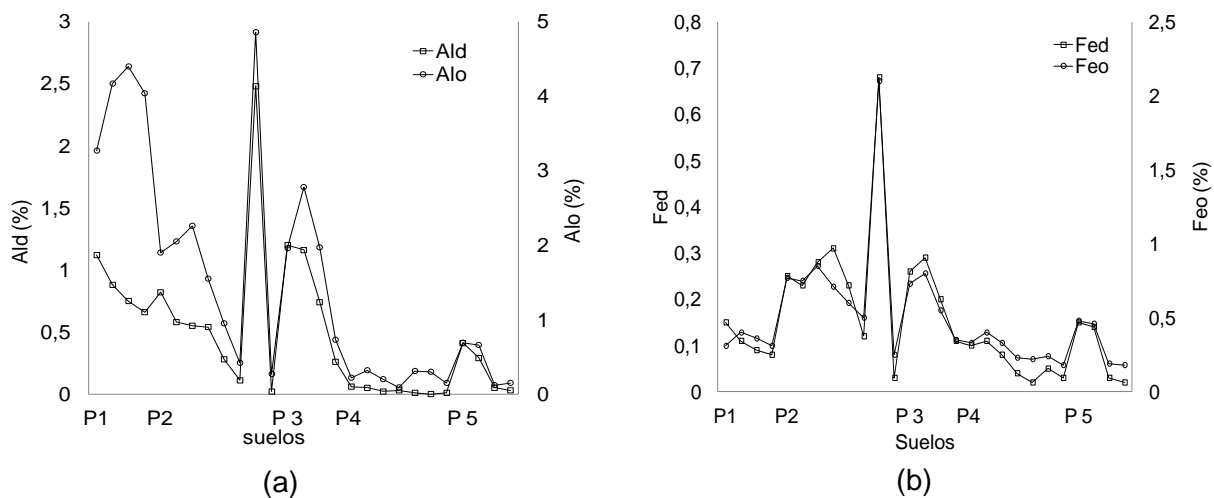


Figura 29. Relación del contenido de Ald y Alo (a) y Fed y Feo (b) de los suelos del Oriente de Michoacán.

De los constituyentes amorfos en los suelos estudiados (Figura 30), el más abundante fue el alófono, el cual varía de manera irregular con la profundidad de los suelos, debido a que se trata de materiales coluviales provenientes de zonas más altas. La cantidad de alófono varió en los perfiles de suelo; específicamente en el espesor 20 cm y 117 cm del

Perfil 2, donde el alófono está ausente pero donde se reportaron altos porcentajes de ferrihidrita (0.42 a 3.58%). La presencia de Fe en estas capas puede estar asociado con la liberación de Fe de minerales ferromagnesianos en proceso de intemperización que se presentan en suelos poco desarrollados (Schwertmann y Taylor, 1989). A la ferrihidrita se le ha asociado con una elevada estabilidad de agregados (Barreal *et al.*, 2001; Schwertmann y Taylor, 1989).

En cuanto a la estimación de los constituyentes amorfos (alofano, imogolita y ferrihidrita) es importante hacer notar que los valores obtenidos no son definitivos para señalar su existencia, siendo necesario en trabajos posteriores, realizar otros estudios que corroboren su presencia.

#### **9.3.3.4. Complejos órgano-minerales**

Se utilizó la relación  $Alp/Ald \leq 1.0$  como indicador de la existencia de complejos humus-Al, y la relación  $0.5 < Fep/Fed < 1.0$  para complejos humus-Fe (Shoji y Fujiwara, 1984). Aunque en la mayoría de los horizontes de los cinco suelos hay ausencia de ambos tipos de complejos, éstos están presentes en los siguientes casos. Los complejos de humus-Al se presentan en todo el Perfil 1 donde la relación  $Alp/Ald$  varió entre 0.85 y 1.07, así como en los primeros cm del Perfil 2 (0.94 y 0.99) y del Perfil 3 (0.86 y 0.91) (Figura 30a). Los complejos humus-Fe sólo se localizan en el Perfil 1 horizonte C3 con una relación  $Fep/Fed$  (0.73), y en el Perfil 4 horizontes C1 y C5 (0.91 y 0.84) (Figura 30b). Los complejos de humus-Al y humus-Fe se asocian con el alto porcentaje de materia orgánica, la cual varía de 9.5 a 16.3% (Figuras 30a y 30b).

Los factores que influyen en la formación de los complejos humus-Al y humus-Fe son altos contenidos de materia orgánica y pH menores a 4.9 (Shoji y Fujiwara, 1984)

condiciones poco frecuentes en la mayoría de los suelos del Oriente de Michoacán en donde los contenidos de MO son menores de 6.0% (Figura 30a) y el pH varía 5.3 a 6.5 (Figura 30c y 30d ), con excepción de los casos antes mencionados en donde la MO si influye en la formación de complejos órgano-minerales, sitios en donde se aprecia que el pH es mayor que el señalado por Shoji y Fujiwara (1984). En la literatura se menciona que los complejos amorfos órgano-minerales (humus-Al, humus-Fe) desempeñan un papel importante en la estabilidad de los agregados (Barreal *et al.*, 2001; Schwertmann y Taylor, 1989) participando también en la formación de la microestructura del suelo (Schwertmann, 1966).

### 9.3.3.5. Análisis estadístico

Al someter los datos a una regresión lineal múltiple para describir la relación Alp/Ald y Fep/Fed con la MO y el pH, se obtuvo que los valores de p en la tabla ANOVA para el Alp/Ald con la MO y el pH son inferiores a 0.05 (0.0308) y 0.01 (0.0015), respectivamente, lo cual significa que sí existe una relación estadísticamente significativa entre estas variables para un nivel de confianza del 95% y 99%, respectivamente (Cuadro 12 y Figura 30), excepto para el Alp/Ald con el pH.

Cuadro 12. Significancia estadística entre los complejos de Humus Al y Fe con la MO y el pH.

| Variables    | p-valor | Ecuación                         | Significancia estadística | Nivel de confianza |
|--------------|---------|----------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Alp/Ald - MO | 0.0308  | $Alp = 3.68573 - 0.227528 * MO$  | Sí                        | %<br>95            |
| Fep/Fed - MO | 0.3918  | $Fep = 1.45031 + 0.0147657 * MO$ | No                        | ≥ 90               |
| Alp/Ald - pH | 0.0015  | $Alp = -22.6449 + 4.18913 * PH$  | Sí                        | 99                 |
| Fep/Fed - pH | 0.1971  | $Fep = 3.27464 - 0.291265 * pH$  | No                        | ≥ 90               |

Alp y Ald: Al extraído con pirofosfato de Na y ditionito citrato bicarbonato; Fep y Fed: Fe extraído con pirofosfato de Na y ditionito citrato bicarbonato; MO: materia orgánica.

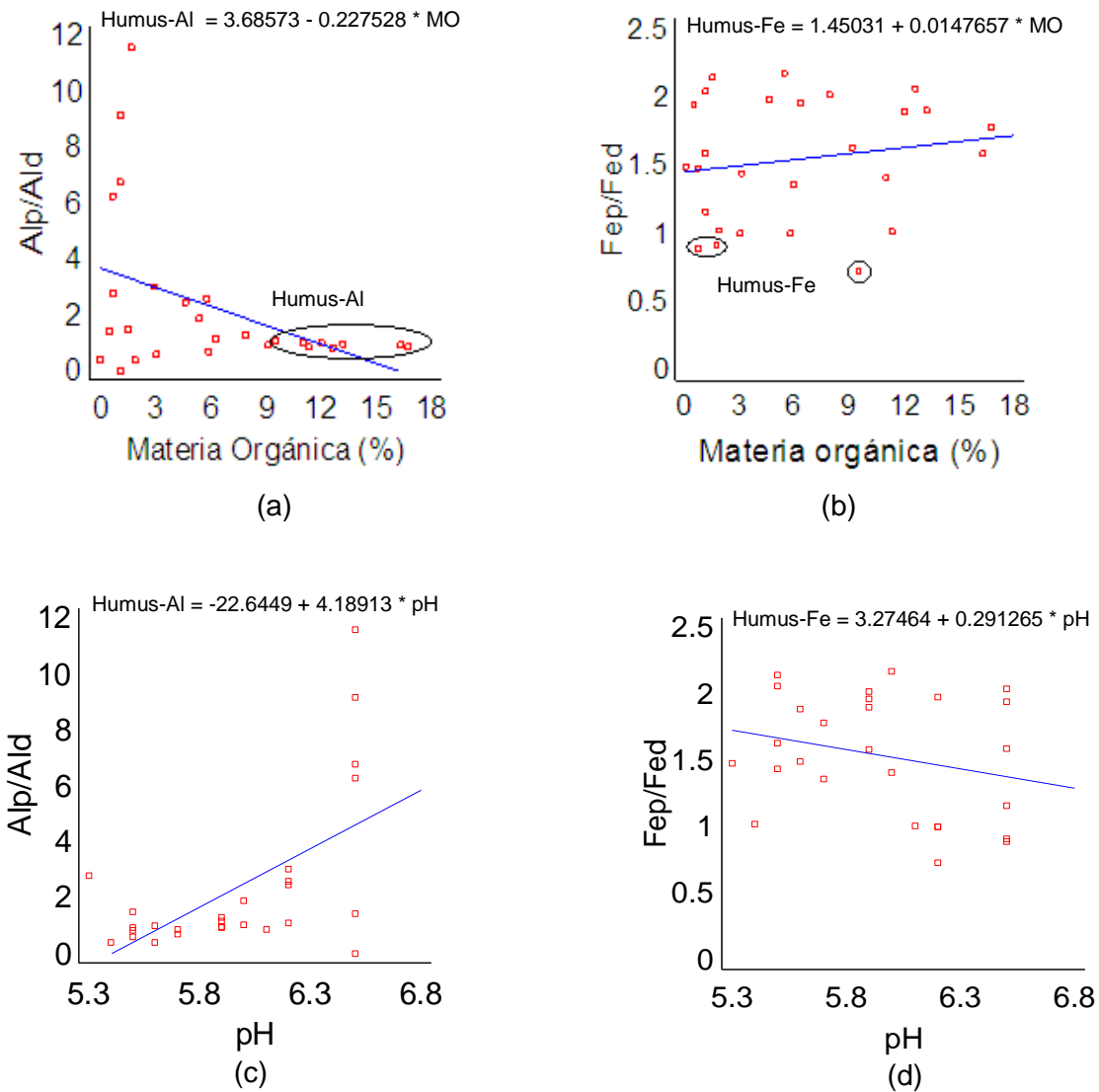


Figura 30. Relaciones entre la materia orgánica y, el  $Alp/Ald$  (a) y  $Fep/Fed$  (b); el  $pH$  y  $Alp/Ald$  (c) y  $Fep/Fed$  (d).

### 9.3.4. Arcillas

Los resultados obtenidos en los difractogramas corridos entre 0 y 70 grados del ángulo  $2\theta$ , se muestran en el Cuadro 13. Las arcillas presentes en los suelos son montmorillonita, caolinita y halloysita, la primera se presenta en la mayoría de los horizontes de los cinco suelos con excepción de algunos de ellos en donde se localiza el horizonte C que se caracteriza por ser un material en proceso de intemperismo. La halloysita se hace

presente en algunos horizontes de todos los suelos, excepto en el Perfil 1 y la caolinita sólo se encontró en los Perfiles 4 y 5. La formación de arcillas silicatadas en los Andosoles estudiados es incipiente y en algunos casos moderada, esto se atribuye a que los suelos sean relativamente jóvenes (FAO-ISRIC-ISSS, 1994).

Cuadro 13. Tipos de arcilla identificadas mediante DRX en suelo total.

| Horizonte.      | Espesor   | Textura Arcilla | DRX Arcillas    |            |           |
|-----------------|-----------|-----------------|-----------------|------------|-----------|
|                 |           |                 | Montmorillonita | Halloysita | Caolinita |
|                 | cm        | %               |                 |            |           |
| <b>Perfil 1</b> |           |                 |                 |            |           |
| A               | 0-22      | 4.0             | X               | -          | -         |
| A2              | 22-65     | 7.6             | -               | -          | -         |
| A3              | 65-110    | 7.6             | X               | -          | -         |
| C               | 110-170   | 7.6             | X               | -          | -         |
| <b>Perfil 2</b> |           |                 |                 |            |           |
| A               | 0-20      | 10.4            | X               | X          | -         |
| A2              | 20-51     | 12.8            | X               | -          | -         |
| A3              | 51-65     | 16.8            | X               | -          | -         |
| AC              | 65-83     | 22.8            | -               | -          | -         |
| C               | 83-95     | 22.8            | X               | X          | -         |
| C2              | 95-117    | 24.0            | X               | -          | -         |
| 2AC             | 117-144   | 4.4             | -               | -          | -         |
| C               | 144-190   | 12.4            | X               | -          | -         |
| <b>Perfil 3</b> |           |                 |                 |            |           |
| A               | 0-23      | 10.4            | X               | X          | -         |
| A2              | 23-50     | 10.8            | X               | X          | -         |
| C               | 50-80     | 17.2            | X               | -          | -         |
| 2C              | 80-125    | 16.4            | X               | -          | -         |
| <b>Perfil 4</b> |           |                 |                 |            |           |
| A               | 0-5       | 10.4            | X               |            | X         |
| A2              | 5-30      | 12.4            | X               | X          | X         |
| C               | 30-41     | 13.2            | X               | -          | -         |
| C2              | 41-64     | 14.4            | X               | -          | -         |
| C3              | 64-80     | 18.8            | -               | -          | X         |
| C4              | 80-88     | 18.0            | -               | -          | X         |
| C5              | 88-130    | 26.0            | -               | -          | X         |
| <b>Perfil 5</b> |           |                 |                 |            |           |
| A               | 0-17.5    | 20.8            | X               | -          | X         |
| C               | 17.5-47.5 | 24.4            | X               | X          | -         |
| 2C              | 47.5-65   | 20.4            | X               | X          | -         |
| 3C              | 65-97.5   | 32.4            | -               | -          | X         |

En suelos en donde hay altos contenidos de arcillas, éstas contribuyen en la agregación de las partículas (Montenegro, 1991) y en especial, las arcillas expandibles como la montmorillonita, dado su alto potencial iónico, el cual se debe a las fuerzas cohesivas que provienen de sus enlaces químicos (Narro, 1994; Figueroa *et al.*, 1991). Sin embargo, en los suelos estudiados las partículas de limo dominan, el cual tiene un potencial iónico bajo (Montenegro, 1991; Narro, 1994; Porta *et al.*, 2003), propio de los Andosoles, por lo tanto, de acuerdo con esto, la agregación de los suelos del Oriente de Michoacán es desfavorable y difícil de lograr estabilidad estructural.

#### **9.3.5. Límites de Atterberg**

Los resultados de los límites de consistencia (Límite líquido y Límite plástico) se presentan en el Cuadro 14 a partir de los cuales se obtuvo el Índice de plasticidad (IP) que indica el grado de plasticidad que presentan los suelos (Juárez, 2012). Además, con base en el diagrama de plasticidad propuesto por Knoblich *et al.* (1996) se graficaron los valores del Límite líquido (LL) y el Índice de plasticidad (IP) para los suelos del Oriente de Michoacán (Figura 31).

Los resultados de los límites de consistencia para todos los suelos, excepto para el Perfil 1 se agrupan principalmente en el intervalo que corresponde a los limos de plasticidad intermedia (LL de 35 a 50%) y plasticidad alta (LL de 50 a 70%), y con cierta tendencia hacia las arcillas de plasticidad baja (LL de 0-35%). En el caso del Perfil 1, no se graficaron los valores del índice de plasticidad ni de los horizontes 2AC y A de los Perfiles 2 y 3, respectivamente, debido a que éstos resultaron sin límite plástico, por lo tanto, su índice de plasticidad fue nulo.

Cuadro 14. Límites de consistencia y plasticidad de los suelos del Oriente de Michoacán.

| Horiz.   | Espesor<br>cm | Textura |      |         | Clase | Límite<br>líquido | Límite<br>plástico | Índice de<br>plasticidad | Plasticidad |
|----------|---------------|---------|------|---------|-------|-------------------|--------------------|--------------------------|-------------|
|          |               | Arena   | Limo | Arcilla |       |                   |                    |                          |             |
|          |               | -       | %    | -       |       |                   | %                  |                          |             |
| Perfil 1 |               |         |      |         |       |                   |                    |                          |             |
| A        | 0-22          | 32.6    | 63.5 | 4.0     | FL    | 74.8              | NP                 | Nula                     | -           |
| A2       | 22-65         | 33.6    | 58.8 | 7.6     | FL    | 58.9              | NP                 | Nula                     | -           |
| A3       | 65-110        | 33.5    | 59.0 | 7.6     | FL    | 54.0              | NP                 | Nula                     | -           |
| C        | 110-170       | 36.1    | 56.4 | 7.6     | FL    | 50.0              | NP                 | Nula                     | -           |
| Perfil 2 |               |         |      |         |       |                   |                    |                          |             |
| A        | 0-20          | 18.6    | 71.1 | 10.4    | FL    | 66.7              | 52.4               | 14.3                     | Alta        |
| A2       | 20-51         | 18.9    | 68.3 | 12.8    | FL    | 64.1              | 50.0               | 14.1                     | Alta        |
| A3       | 51-65         | 18.4    | 64.9 | 16.8    | FL    | 52.8              | 41.4               | 11.4                     | Alta        |
| AC       | 65-83         | 19.7    | 57.6 | 22.8    | FL    | 53.8              | 41.2               | 12.6                     | Alta        |
| C        | 83-95         | 16.8    | 60.4 | 22.8    | FL    | 46.0              | 38.5               | 7.5                      | Intermedia  |
| C2       | 95-117        | 20.9    | 55.2 | 24.0    | FL    | 41.7              | 32.8               | 8.9                      | Intermedia  |
| 2AC      | 117-144       | 26.1    | 69.5 | 4.4     | FL    | 82.5              | NP                 | Nula                     | -           |
| C        | 144-190       | 33.9    | 53.8 | 12.4    | FL    | 55.4              | 50.0               | 5.4                      | Alta        |
| Perfil 3 |               |         |      |         |       |                   |                    |                          |             |
| A        | 0-23          | 23.0    | 66.7 | 10.4    | FL    | 68.2              | NP                 | Nula                     | -           |
| A2       | 23-50         | 23.3    | 66.0 | 10.8    | FL    | 60.4              | 53.5               | 6.9                      | Alta        |
| C        | 50-80         | 25.3    | 57.5 | 17.2    | FL    | 46.8              | 29.7               | 17.1                     | Intermedia  |
| 2C       | 80-125        | 23.6    | 60.1 | 16.4    | FL    | 34.5              | 23.1               | 11.4                     | Baja        |
| Perfil 4 |               |         |      |         |       |                   |                    |                          |             |
| A        | 0-5           | 39.9    | 49.7 | 10.4    | F     | 40.6              | 33.3               | 7.3                      | Intermedia  |
| A2       | 5-30          | 33.9    | 53.7 | 12.4    | FL    | 33.8              | 20.3               | 13.5                     | Baja        |
| C        | 30-41         | 38.4    | 48.4 | 13.2    | F     | 32.1              | 27.8               | 4.3                      | Baja        |
| C2       | 41-64         | 35.1    | 50.6 | 14.4    | FL    | 28.8              | 23.3               | 5.5                      | Baja        |
| C3       | 64-80         | 39.6    | 41.7 | 18.8    | F     | 30.8              | 23.7               | 7.1                      | Baja        |
| C4       | 80-88         | 38.9    | 43.2 | 18.0    | F     | 32.9              | 17.1               | 15.8                     | Baja        |
| C5       | 88-130        | 30.1    | 43.9 | 26.0    | F     | 38.4              | 20.0               | 18.4                     | Intermedia  |
| Perfil 5 |               |         |      |         |       |                   |                    |                          |             |
| A        | 0-17.5        | 29.8    | 49.5 | 20.8    | F     | 41.2              | 30.3               | 10.9                     | Intermedia  |
| C        | 17.5-47.5     | 23.9    | 51.7 | 24.4    | FL    | 35.3              | 27.0               | 8.3                      | Intermedia  |
| 2C       | 47.5-65       | 27.8    | 51.8 | 20.4    | FL    | 29.5              | 21.2               | 8.3                      | Baja        |
| 3C       | 65-97.5       | 21.8    | 45.9 | 32.4    | FL    | 47.3              | 28.6               | 18.7                     | Intermedia  |

Horiz.: horizonte; Textura: A= arena, L = limo, R = arcilla, F = franco, FL = franco limoso; NP: no plástico.

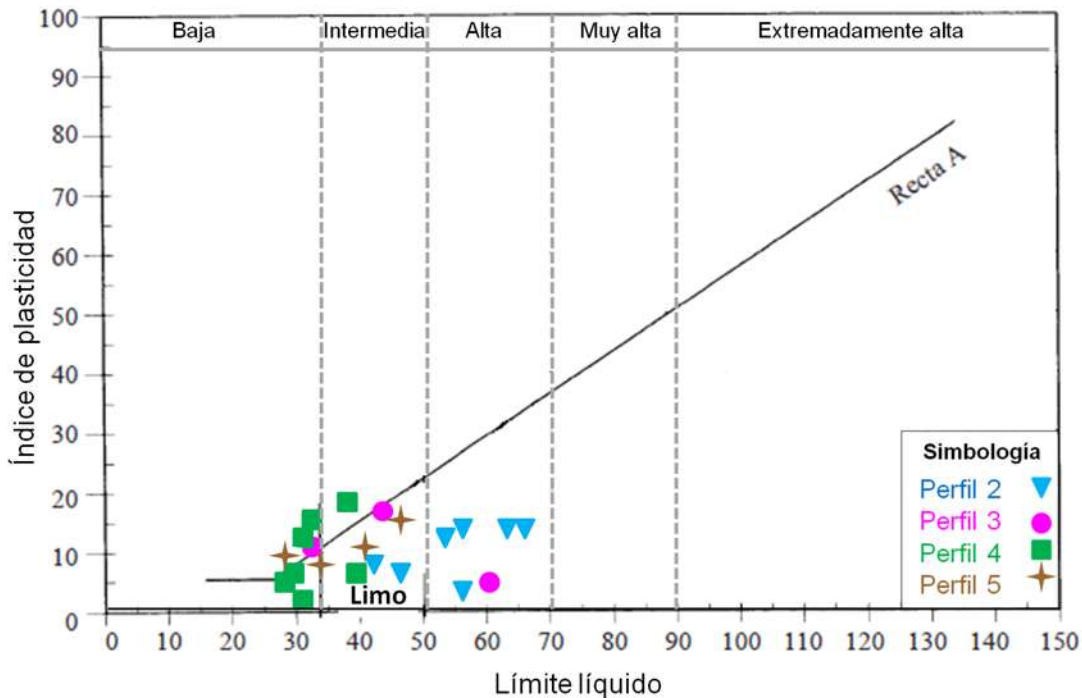


Figura 31. Diagrama de plasticidad de los suelos del Oriente de Michoacán.

En la literatura se reporta que los suelos tienen diversos grados de plasticidad según la cantidad y tipo de arcilla que contengan, por ejemplo, en el caso de porcentajes mayores de 50% de arcilla, el índice de plasticidad es mayor 20% (Baver *et al.*, 1980), relación que no se presenta en los suelos del Oriente de Michoacán porque los valores de arcilla son menores de 32% (Cuadro 14), sin embargo, en los suelos estudiados sí se alcanzan índices plásticos altos en la mayoría de horizontes del Perfil 2 y en el A2 del Perfil 3. En el caso de los horizontes A del Perfil 2 en donde hay índices plásticos altos, los porcentajes de limo (68.3 a 71.1%) también son los más altos. En el Perfil 1 la plasticidad está ausente y en el P4 es baja, casos que se asocian a los porcentajes de arena más altos (32.6 a 39.6%) que al no retener agua la plasticidad es baja o nula.

No obstante, las arcillas como la montmorillonita juegan un papel importante en la alta plasticidad de los suelos a causa del almacenamiento de agua en su estructura (Baver *et al.*, 1980) por su gran potencial de expansión (García, 1985), arcillas que se presentan en la mayoría de los horizontes de los suelos estudiados (Cuadro 14) y que pueden estar participando en su plasticidad a niveles altos, intermedios y bajos en combinación con otros constituyentes del suelo como los amorfos alófono, imogolita y ferrihidrita.

Por una parte, las arcillas contribuyen en la agregación de las partículas del suelo (Montenegro, 1991) y específicamente las arcillas expandibles como la montmorillonita, debido a su potencial iónico y su alta pegajosidad (Narro, 1994). Por otra parte, en los suelos con plasticidad alta que contienen montmorillonita, ésta al almacenar agua en su estructura y al haber un cambio volumétrico de los cristales, tiende a una alta inestabilidad por el cambio de volumen y las presiones que generan en contacto con el agua, por lo que son consideradas como las más inestables (García, 1985). Lo anterior muestra por una parte lo favorable de las arcillas al agregar las partículas de suelo, mientras que por otra parte dada su naturaleza expansiva trae como consecuencia su inestabilidad que también se manifiesta en los agregados del suelo.

La densidad aparente de los suelos del Oriente de Michoacán son menores o iguales a  $0.9 \text{ g cm}^{-3}$  (hasta  $0.58 \text{ g cm}^{-3}$ ) valores propios de Andosoles (Soil Survey Staff, 2006), con excepción de algunos horizontes del Perfil 4 y todo el Perfil 5, lo cual confiere a los suelos alta porosidad y alta retención de agua a capacidad de campo (33 kPa) desde 22.7% a 57.1%, siendo los valores más bajos para el Perfil 4 y los más altos para el Perfil 2 (Cuadro 5). Sin embargo, la deshidratación de los suelos es irreversible y los suelos se

vuelven susceptibles a la erosión (FAO-ISRIC-ISSS, 1994). Además de la retención de agua en los poros, ésta se lleva a cabo en los constituyentes amorfos como el alófono que tienen una superficie específica de 70 a 300 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> y un alto grado de hidratación (Porta *et al.*, 1999; Ortega, 1981), pero a pesar de esto, en dichos amorfos es inusual la plasticidad, pero a baja presión se produce el fenómeno conocido como tixotropía que se manifiesta cuando el suelo está húmedo y al presionarlo se vuelve plástico y libera agua (FitzPatrick, 1993), fenómeno que puede estar asociado con la plasticidad de los suelos del Oriente de Michoacán.

Los Andosoles cuando están hidratados mantienen una estructura friable, pero cuando infiltran demasiada agua y la retienen se vuelven inestables, por lo tanto su fuerza disminuye y la desintegración de los agregados menos estables reducen la resistencia de éstos, dándose el colapso de los agregados, aunado a ello, la pendiente del terreno, el material del suelo se desprende y por acción de la gravedad se producen los deslizamientos en forma rápida. El presente trabajo coincide con Knoblich *et al.* (1996) en que las altas precipitaciones influyen de manera primordial en la inestabilidad de los agregados y por consecuencia en los deslizamientos de laderas.

#### **9.3.6. Estabilidad de agregados**

A continuación, se muestra la distribución de los agregados estables al agua por su tamaño y diámetro medio ponderado (DMP), los cuales fueron divididos en macro, meso y microagregados (Cuadro 15). La distribución de los agregados para los cinco suelos estudiados resultó en promedio mayor para los micro y mesoagregados (53.47% y 38.55%, respectivamente).

Cuadro 15. Distribución de agregados estables en agua por tamaño de acuerdo con el método de Yoder (1936).

| Horiz.   | Espesor   | Macroagregados<br>> 4.76 | Mesoagregados<br>4.76- 0.25 | Microagregados<br>≤ 0.25 | DMP  |
|----------|-----------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|------|
|          | cm        |                          | %                           |                          | mm   |
| Perfil 1 |           |                          |                             |                          |      |
| A        | 0-22      | 8.09                     | 16.09                       | 75.8                     | 2.81 |
| A2       | 22-65     | 1.51                     | 26.25                       | 72.2                     | 2.42 |
| A3       | 65-110    | 2.29                     | 38.9                        | 58.8                     | 2.25 |
| C        | 110-170   | 2.43                     | 8.63                        | 88.9                     | 2.67 |
| Perfil 2 |           |                          |                             |                          |      |
| A        | 0-20      | 9.02                     | 41.34                       | 49.7                     | 2.69 |
| A2       | 20-51     | 1.56                     | 49.46                       | 48.9                     | 1.63 |
| A3       | 51-65     | 6.46                     | 57.79                       | 35.8                     | 2.22 |
| AC       | 65-83     | 35.7                     | 39.8                        | 24.5                     | 3.26 |
| C        | 83-95     | 24.6                     | 52.77                       | 22.6                     | 2.54 |
| C2       | 95-117    | 1.8                      | 49.55                       | 48.6                     | 1.50 |
| 2AC      | 117-144   | 9.19                     | 42.31                       | 48.5                     | 1.23 |
| C        | 144-190   | 11.71                    | 36.2                        | 52.1                     | 1.45 |
| Perfil 3 |           |                          |                             |                          |      |
| A        | 0-23      | 15.0                     | 45.51                       | 39.5                     | 3.08 |
| A2       | 23-50     | 4.26                     | 35.71                       | 60.0                     | 1.56 |
| C        | 50-80     | 9.16                     | 30.89                       | 60.0                     | 2.49 |
| 2C       | 80-125    | 11.38                    | 39.43                       | 49.2                     | 2.03 |
| Perfil 4 |           |                          |                             |                          |      |
| A        | 0-5       | 9.13                     | 47.52                       | 43.3                     | 2.02 |
| A2       | 5-30      | 9.06                     | 35.98                       | 55.0                     | 1.66 |
| C        | 30-41     | 2.65                     | 49.67                       | 47.7                     | 1.12 |
| C2       | 41-64     | 6.11                     | 38.54                       | 55.3                     | 2.19 |
| C3       | 64-80     | 8.7                      | 36.91                       | 54.4                     | 1.97 |
| C4       | 80-88     | 10.31                    | 31.11                       | 58.6                     | 2.18 |
| C5       | 88-130    | 12.5                     | 52.81                       | 34.6                     | 1.95 |
| Perfil 5 |           |                          |                             |                          |      |
| A        | 0-17.5    | 11.2                     | 35.99                       | 52.7                     | 2.11 |
| C        | 17.5-47.5 | 4.05                     | 59.54                       | 36.4                     | 1.47 |
| 2C       | 47.5-65   | 2.62                     | 23.67                       | 73.7                     | 0.27 |
| 3C       | 65-97.5   | 3.61                     | 58.87                       | 37.6                     | 0.91 |

DMP = Diámetro Medio Ponderado.

La estabilidad de los agregados de acuerdo con el DMP para los diferentes perfiles de suelo no mantuvo un patrón definido, pero si hubo una tendencia al aumento de los microagregados, excepto para el Perfil 2 en donde dominaron los mesoagregados (Figura 32).

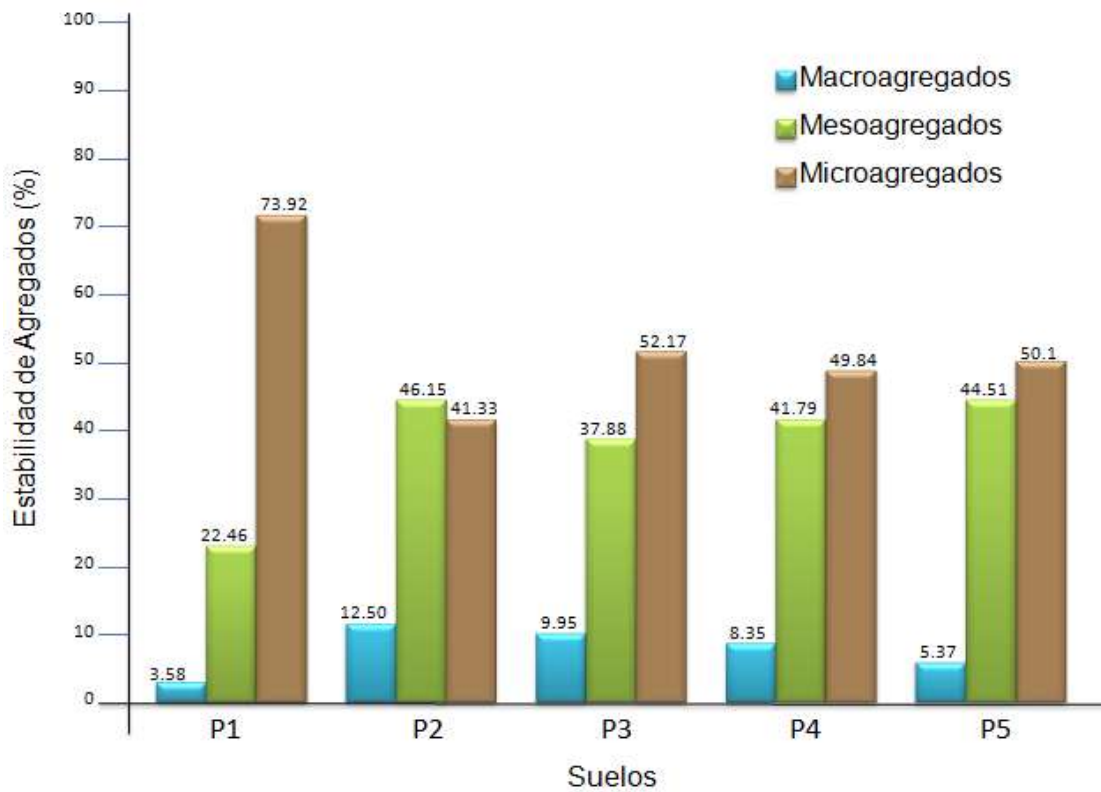


Figura 32. Distribución de estabilidad de agregados en los suelos.

El diámetro medio ponderado (DMP) en promedio de todos los suelos fue de 1.98 mm. De acuerdo con la clasificación de estabilidad de agregados propuesta por Le Bissonnais y Le Souder (1995) basada en los valores en promedio del DMP (Cuadro 2), los agregados de los Perfiles 1, 2 y 3 se clasificaron como muy estables, los del Perfil 4 como estables y del Perfil 5 como moderadamente estable (Figura 33).

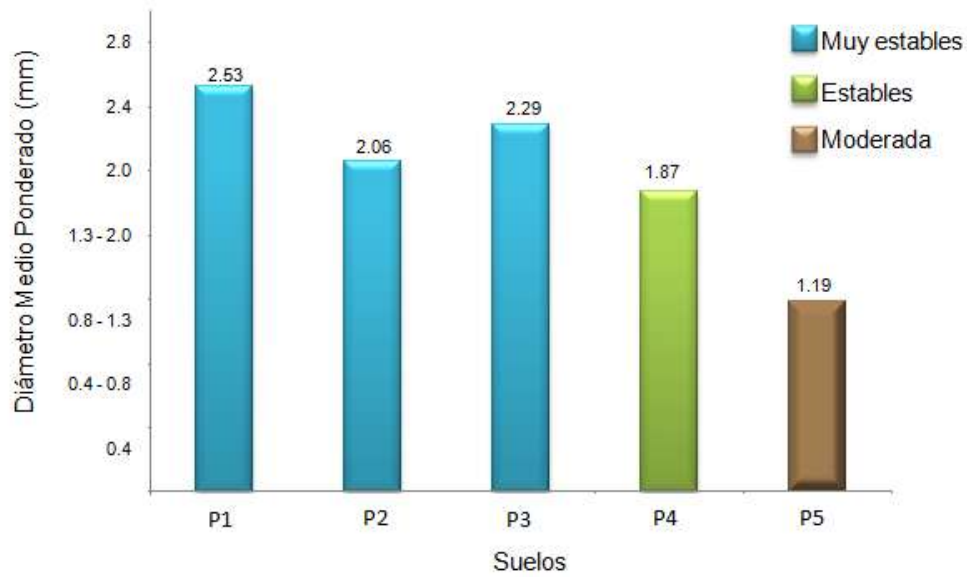


Figura 33. Clases de estabilidad de agregados en húmedo de acuerdo con el DMP propuesto por Le Bissonnais y Le Souder (1995) en los suelos estudiados.

El DMP de los agregados muy estables fue mayor de 2 mm en una profundidad que supera los 95 cm de espesor (Perfiles 1 al 3). En los Perfiles 4 y 5, existió una variabilidad importante, las diferencias se observaron sobre todo entre los primeros dos horizontes denominados A, al clasificarse como muy estables y estables en un espesor de 0 a 30 cm (Perfil 4) y de 0 a 47.5 cm (Perfil 5). La disminución de la estabilidad de los agregados en los horizontes C, puede deberse a la disminución de raíces, las cuales le confieren mayor estabilidad a los agregados del suelo. En el Perfil 5 se presentó menor estabilidad, debido al cambio de uso del suelo pues el cambio de cobertura vegetal en pendientes pronunciadas repercute en la disminución de la agregación del suelo (Martínez-Trinidad *et al.*, 2008) (Figura 34).

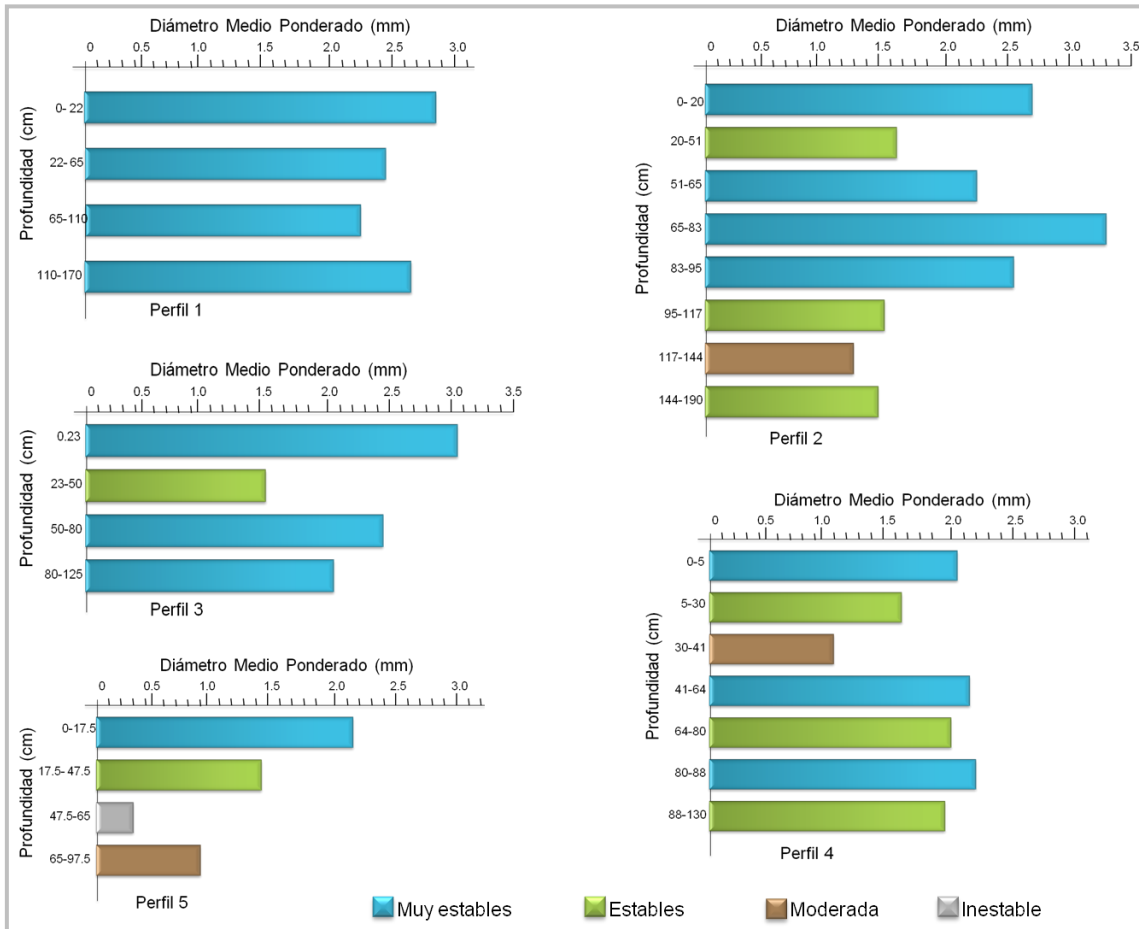


Figura 34. Diámetro medio ponderado en relación con la profundidad de los suelos.

### 9.3.7. Análisis estadístico

#### 9.3.7.1. Macro, Meso y Microagregados y factores que influyen en su estabilidad

De acuerdo con los resultados de una regresión lineal múltiple para cada uno de los perfiles de suelo en relación de los macro, meso y microagregados con los factores que influyen en su estabilidad (Cuadro 16) se obtuvo que la relación entre las variables estadísticamente significativa sólo se dio para los macroagregados de todos los suelos al obtenerse una  $R^2$  que varía de 50.5 a 99.9% y valores de p en la tabla ANOVA menores a 0.05, relación estadística que no se obtuvo en el Perfil 2.

Cuadro 16. Regresión lineal múltiple a partir de la relación entre los macroagregados del suelo y los factores que influyen en su estabilidad.

| Perfiles | VARIABLES      | p-valor | R <sup>2</sup> | Ecuación                                   | Nivel confianza % |
|----------|----------------|---------|----------------|--|-------------------|
| 1        | Macroagregados |         |                |  |                   |
|          | Al +1/2 Fe     | 0.0561  | 89.092         | Al+1/2Fe = 4.71196-0.158368*Macroagregados |                   |
|          | ALO            | 0.0270  | 94.669         | ALO = 15.8979 - 0.672587 * Macroagregados  | 95                |
|          | MO             | 0.0620  | 87.976         | MO = 8.75236 + 0.914145 * Macroagregados   | 90                |
|          | R              | 0.0089  | 98.220         | R = 8.80509 - 0.588014 * Macroagregados    | 99                |
| 3        | MO             | 0.0204  | 99.897         | MO = 14.5591 - 1.26925 * Macroagregados    | 90                |
| 4        | ALO            | 0.0735  | 50.499         | ALO = 31.0054 - 2.34139 * Macroagregados   | 90                |
|          | IP             | 0.0181  | 70.483         | IP = -2.03917 + 1.47407 * Macroagregados   | 90                |
| 5        | MO             | 0.0310  | 93.899         | MO = -0.571191+ 0.571916*Macroagregados    | 90                |

A: arena; R: arcilla; ALO: Alofano; MO: materia orgánica; IP: Índice plástico; RA: retención de agua

La estabilidad de los macroagregados se debe a los constituyentes amorfos de tipo alófono en los Perfiles 1 y 4; la MO en los Perfiles 1, 3 y 5, principalmente en los horizontes superficiales de los suelos; el porcentaje de arcillas y el índice plástico en los Perfiles 1 y 4. La MO es un agente cementante que influye en la formación y estabilidad de los agregados del suelo, dándoles porosidad para el movimiento de agua y aire (Porta *et al.*, 2003; Montenegro, 1991). Las arcillas expandibles tienen un alto potencial iónico que dan resistencia a los agregados, debido a las fuerzas cohesivas que provienen de sus enlaces químicos (Narro, 1994).

De las correlaciones hechas con el contenido de MO, se obtuvo que está tuvo mayor influencia en la estabilidad de los horizontes superficiales, cuya relación fue mayor con los macroagregados de los Perfiles 1, 3 y 5 ( $r^2 = 87.97, 99.89$  y  $93.89\%$ , respectivamente) (Cuadro 16).

En resumen y por orden de los principales factores que influyen en la estabilidad de los macroagregados de los suelos son: el alofano, la MO y en menor proporción las arcillas y el Índice plástico.

### 9.3.7.2. Diámetro Medio ponderado (DMP) y factores que influyen en la estabilidad de los agregados

Los resultados de la regresión lineal múltiple para describir la relación entre el DMP y, los agregados muy estables y agregados estables a moderadamente estables se presentan en el Cuadro 17 en donde se muestra que para la mayoría de las variables no se obtuvo una relación estadísticamente significativa para ambos grupos de agregados, únicamente para los agregados muy estables con cinco de las variables: arena (A), limo (L), amorfos ( $Al+1/2Fe$ ), ferrihidrita (FER) y MO para las que se obtuvieron valores de  $p < 0.05$  (0.043) y  $R^2$  de 63.8% en la tabla de ANOVA (Figura 35), sin embargo, considerando que las arenas no agregan y los limos tienen un potencial iónico bajo (Montenegro, 1991; Narro, 1994; Porta *et al.*, 2003) son factores que no participan en la estabilidad de los agregados, por lo tanto, se obtuvo la Ecuación 2 con una  $p$  de 0.032 y  $R^2$  de 50.6%, ambas ecuaciones con un nivel de confianza de 95%. De acuerdo con lo anterior, los factores que se asocian a la estabilidad de los agregados muy estables son en conjunto todos los constituyentes amorfos, la ferrihidrita y la materia orgánica.

Ecuaciones para agregados muy estables con DMP de:

Ecuación 1

$$\text{DMP} = 6.69286 + 0.0428448 * \text{Al+1/2Fe} - 0.351361 * \text{FER} + 0.0819366 * \text{MO} - 0.0497046 * \text{L} - 0.0631732 * \text{A}$$

Ecuación 2

$$\text{DMP} = 1.74627 + 0.0115112 * \text{Al}+1/2\text{Fe} + 0.449084 * \text{FER} + 0.0390895 * \text{MO}$$

En donde:

DMP = Diámetro Medio Ponderado; Al+1/2Fe = amorfos (alófano, imogolita y ferrihidrita); FER = ferrihidrita; MO = materia orgánica; L = limo; A = arena.

Cuadro 17. Estabilidad de agregados de acuerdo con el Diámetro Medio Ponderado (DMP).

| Variables   | p-valor       | Ecuación                                | Significancia estadística | Nivel de confianza |
|---|---------------|---|---------------------------|--------------------|
| %   |               |   |                           |                    |
| <b>Agregados muy estables</b>                         |               |   |                           |                    |
| <b>DMP-A</b>  | <b>0.0810</b> | <b>DMP = 3.13895 - 0.0256391*A</b>      | <b>Sí</b>                 | <b>90</b>          |
| <b>DMP-L</b>  | <b>0.0497</b> | <b>DMP = 0.616216 + 0.0309932*L</b>     | <b>Sí</b>                 | <b>95</b>          |
| DMP-R   | 0.9710        | DMP = 2.41419 - 0.000760566*R           | No                        | 90                 |
| <b>DMP-Al+1/2Fe</b>                                   | <b>0.0776</b> | <b>DMP = 2.1470 + 0.129854*Al+1/2Fe</b> | <b>Sí</b>                 | <b>90</b>          |
| DMP-ALO   | 0.9264        | DMP = 2.39249 + 0.00143713*ALO          | No                        | 90                 |
| <b>DMP-FER</b>  | <b>0.0310</b> | <b>DMP = 1.86188 + 0.682666*FER</b>     | <b>Sí</b>                 | <b>95</b>          |
| <b>DMP-MO</b>   | <b>0.0086</b> | <b>DMP = 2.02812 + 0.0527658*MO</b>     | <b>Sí</b>                 | <b>99</b>          |
| DMP-Humus-Al  | 0.5699        | DMP = 2.46586 - 0.044341*Alp            | No                        | 90                 |
| DMP-Humus-Fe  | 0.5096        | DMP = 2.11029 + 0.191411*Fep            | No                        | 90                 |
| DMP-LP  | 0.6886        | DMP = 2.46264 - 0.00790526*LP           | No                        | 90                 |
| <b>Agregados de estables a moderadamente estables</b> |               |   |                           |                    |
| DMP-A   | 0.5849        | DMP = 1.14478 + 0.0106248*A             | No                        | 90                 |
| DMP-L   | 0.8964        | DMP = 1.53901 - 0.00184378*L            | No                        | 90                 |
| DMP-R   | 0.7573        | DMP = 1.53324 - 0.00518865*R            | No                        | 90                 |
| DMP-Amorfos   | 0.9970        | DMP = 1.43948 - 0.00028550* Al+1/2Fe    | No                        | 90                 |
| DMP-ALO   | 0.1274        | DMP = 1.62888 - 0.0258565*ALO           | No                        | 90                 |
| DMP-FER   | 0.8762        | DMP = 1.46046 - 0.0226489*FER           | No                        | 90                 |
| DMP-MO  | 0.7299        | DMP = 1.39384 + 0.00993561*MO           | No                        | 90                 |
| DMP-Humus-Al  | 0.5729        | DMP = 1.36487 + 0.0205191*Alp           | No                        | 90                 |
| DMP-Humus-Fe  | 0.6050        | DMP = 1.65467 - 0.139082*Fep            | No                        | 90                 |
| DMP-LP  | 0.5479        | DMP = 1.29865 + 0.014238*LP             | No                        | 90                 |

DMP = Diámetro Medio Ponderado; A = arena; L = limo; R = arcilla; ALO = Alófano; FER = ferrihidrita; MO = materia orgánica; LP = límite plástico

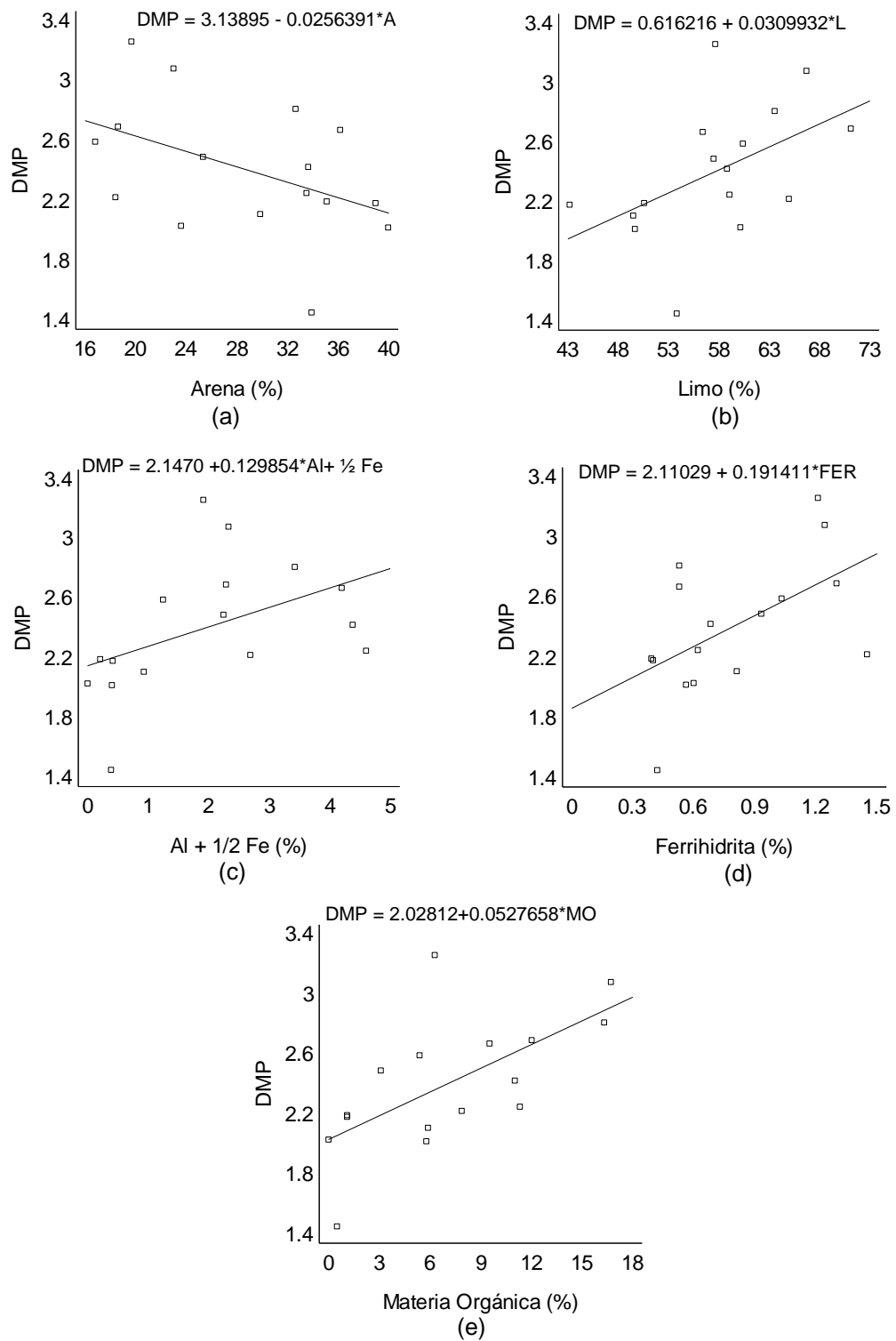


Figura 35. Variación del DMP con: arena (a); limo (b); Al + ½ Fe (c); Ferrihidrita (d); y la Materia orgánica (e).

## 10. CONCLUSIONES

1. Los suelos del Oriente de Michoacán se clasificaron en dos Grupos: Andosol y Leptosol. Andosoles silándicos úmbricos (Perfiles 1 y 3) y Andosoles vítricos úmbricos (Perfiles 2 y 4).

2. Los Andosoles son ácidos (pH de 5.5 a 6.2), ricos en materia orgánica en los horizontes superficiales (5.8% a 16.7%) con densidad aparente que varía de 0.58 a 1.72 g cm<sup>-3</sup>; Al + ½ Fe de 0.40% a 4.59%; una retención de fosfatos de 27% a 98% y vidrio volcánico.

3. Cuatro de cinco suelos clasificados como Andosoles coinciden con lo reportado por el INEGI.

4. Se dan a conocer las evidencias que avalan la clasificación de los suelos del presente estudio, utilizando el sistema de clasificación de la WRB (2007).

5. De acuerdo con los criterios requeridos por la Leyenda del Mapa Mundial de Suelos (1970) utilizado por el INEGI para clasificar a los Andosoles, en las cartas edafológicas no se dan a conocer los datos que avalan dicha clasificación.

6. Las propiedades físicas y químicas de los suelos que participan en la estabilidad de los agregados son:

- Materia orgánica, especialmente en los horizontes superficiales de todos los suelos.
- Alófano en los Perfiles 1, 3 y 4, y la ferrihidrita e imogolita en el Perfil 2.
- Complejos de humus-Al en el Perfil 1 y en los primeros 51 cm de los Perfiles 2 y 3.
- Complejos de humus-Fe sólo en el horizonte C del Perfil 1.

- La montmorillonita en todos los suelos, pero por su naturaleza expansiva tiende a la inestabilidad en presencia de agua.

7. Existe una correlación estadísticamente significativa entre los macroagregados con el alófono, materia orgánica y arcillas en todos los suelos, excepto en el Perfil 2.

8. Las clases de estabilidad de los agregados de acuerdo con su diámetro medio ponderado (DMP) es la siguiente:

- Muy estables con DMP mayores de 2 mm en los Perfiles 1, 2 y 3.
- Estables con DMP entre 1.3 y 2.0 mm en el Perfil 4.
- Moderadamente estables con DMP de 0.8 a 1.3 mm en el Perfil 5.

9. Existe una correlación estadísticamente significativa entre los agregados muy estables con el  $Al + 1/2Fe$  (amorfo en general), la ferrihidrita y la materia orgánica.

10. La estabilidad de los agregados de los Andosoles y del Leptosol estudiados puede conservarse si se mantienen como áreas forestales, de lo contrario, por ser de textura limosa son inestables tanto secos como húmedos.

En resumen, los agregados de los suelos tienen cierto grado de estabilidad (muy estables, estables y moderadamente estables) en donde participan varias propiedades físicas y químicas, pero en presencia de factores externos como el exceso de agua y áreas de fuerte inclinación, los agregados se desestabilizan, por lo que podrían influir de manera directa en la precipitación de los deslizamientos de materiales de las laderas de los suelos del Oriente de Michoacán.

## 11. RECOMENDACIONES

Determinar la presencia de los constituyentes amorfos y de las arcillas con otros métodos para corroborar su presencia.

Continuar con una revisión más profunda de los minerales de los suelos estudiados, puesto que en el presente trabajo la descripción es general.

Realizar estudios de génesis de los suelos con el objeto de saber si los Andosoles al Oriente de Michoacán provienen de andesita o de vidrio volcánico.

Difundir la información sobre propiedades físicas y químicas así como la estabilidad de los agregados de los suelos del presente estudio de manera sintetizada entre los pobladores de las comunidades afectadas por los deslizamientos, con la finalidad de que cuenten con un panorama general sobre el comportamiento de los Andosoles.

## 12. LITERATURA CITADA

- Alcalá D. J. M., C. A. Ortiz S., y M. C. Gutiérrez C. 2001. Clasificación de los Suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra* 19:227-239.
- Alcalá D. J. M., 2003. Los Andisoles de la Meseta Tarasca, Michoacán. Su Clasificación Taxonómica, Propiedades y Mineralogía. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México. 143pp.
- Álvarez, C.R., P.L. Fernández y M.A. Taboada. 2012. Estabilidad Estructural: Efecto del Manejo y Relación con Otras Propiedades Edáficas. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Baver L.D., W.H. Gardner. y W.R. Gardner. 1980. Física de Suelos. Ed. Unión Tipográfica, Hispano-Americana, S.A de C.V. 529pp.
- Baldock, J. y P. Nelson. 1999. Soil Organic Matter. In: Sumner, M. (ed). Handbook of Soil Science. Boca Raton, USA. CRC Press. 25-84pp.
- Barreal, M. E., M. Camps A., F. Macías y A. E. Fertitta. 2001. Phosphate and sulfate retention by nonvolcanic soils with andic properties. *Soil Science* 166:691-707.
- Blakemore, L. C., P. L. Searle y B. K. Daly. 1987. Methods for chemical analysis of soils. NZ Soil Bureau Sci. Rep. 80. Soil Bureau, Lower Hutt, New Zealand.
- Boix-fayos, C., A. Calvo-Cases., A.C. Imeson and M.D. Soriano-Soto. 2001. Influence of Soil Properties on the Aggregation of some Mediterranean Soils and the Use of Aggregate Size and Stability as Land degradation Indicators. *Catena* 44: 47-67.
- Brady, N.C.1984. The Nature and Properties of Soils. 9ª ed. Macmillan Publishing Company, U.S.A.
- Buol, S. W. F., Hole, R., Mc Cracken. 1990. Génesis y Clasificación de Suelos. Editorial Trillas. México. 267pp.
- Calderon S. F. 1996. La Estabilidad Estructural del Suelo. Labnews. Serie Divulgativa No. 2 Bogotá D. C., Colombia S.A.
- Chaney, K. and R. S. Swift. 1984. The Influence of Organic Matter on Aggregate Stability in some British Soils. *Journal of Soil Science*. 35: 223-230.
- Childs, C. W., N. Matsue y N. Yoshinaga. 1991. Ferrihydrite in Volcanic Ash Soils of Japan. *Soil Sci. Plant Nutr*. 37:299-311.
- Correa-Pérez G. 2003. Atlas Geográfico del Estado de Michoacán. Segunda edición. (SEMARNAT) Secretaría de Educación en el Estado de Michoacán. *UMSNH. EDDISA S. A de C. V.* México. 309 pp.
- Cortés V. M.O. 2010. Clasificación y Colección de Suelos en la Microcuenca de Atécuaro, Mpio. de Morelia, Mich. Tesis de Licenciatura. 103pp.

- Cuanalo C., H. 1990. Manual para la Descripción de Perfiles de Suelos en el Campo. 3a. ed. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 40 pp.
- Demant, A. 1982. Interpretación Geodinámica del Vulcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano. *Revista del Instituto de Geología*, Vol 5, Nº 2, UNAM, México. 217-222 p.
- Demant, A. y Robin, C. 1975. Las fases del vulcanismo en México: Una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el Cretácico. *Revista del Instituto de Geología*, Nº 1, UNAM, México, 66-79 p.
- Ellies, A., R. Grez y C. Ramírez. 1996. Efecto de la Materia Orgánica sobre la Capacidad de Humectación y las Propiedades Estructurales de algunos Suelos de la Zona Centro Sur de Chile. *Agrosur (Chile)*. 24 (1): 48-58.
- FAO-UNESCO (FAO-Organización de las Naciones Unidas para Educación, la Ciencia y la Cultura). 1970. Clave de las unidades de suelos para el mapa de suelos del mundo. Proyecto FAO-UNESCO. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección General de Estudios. Dirección de Agrología. México, D. F. p 125.
- FAO, ISRIC, ISSS. 1994. World Reference Base for Soil Resources (WRB). Draft. O. C. Spaargaren (ed.). Wageningen, Rome.
- Figueroa M. S. 2013. Estudio del Peligro por Flujos de Detritos y Corrientes Hiperconcentradas Mediante Simulación Numérica en FLO-2D, Caso de Estudio: Angangueo, Mich. 152pp.
- FitzPatrick, E. A. 1993. Suelos. Su Formación, Clasificación y Distribución. Ed. CECSA. México, D.F.
- Fortun C., y A. Fortun. 1989. Diversos aspectos sobre el papel de la materia orgánica humificada en la formación y estabilización del los agregados del suelo. *Edafol. Agrobiol.* 48: 185-204.
- García V. A. 1985. Origen y Composición de las Arcillas Cerámicas. Instituto de Cerámica y Vidrio, C.S.I.C. Arganda del Rey (Madrid). Vol. 24 (6): 395-404.
- García E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Harsh J., J. Chorover and E. Nizeyimana. 2002. Allophane and Imogolite. *In: J. B. Dixon and D. G. Schulze (ed.) Soil Mineralogy whit environmental applications.* S.S.C.A. Madison, Wisconsin.
- Hermawan B. and A. Bomke. 1997. Effects of Winter Cover Crops and Successive Spring Tillage on Soil Aggregation. *Soil Till. Res.* 44:109-120.
- Hidalgo, M. C. 2004. Arcillas de Corto Alcance : *In: N. E. García C., M. A. Hoyos., S. Bribiesca., J. B. Dixon., O. A. Acevedo., C. Hidalgo., R., Lozano., E. Vallejo y M. Osterrieth.* *Cristalografía de Suelos (ed.) Sociedad Mexicana de Cristalografía de Suelos A. C.* 218pp.

- Higashi, T. y A. Shinagawa. 1981. Comparison of sodium hydroxide - tetraborate and sodium pyrophosphate as extractants of Al-Fe-humus "complexes" in Dystrandepts, Japan. *Geoderma*. 25:285-292.
- Ibarra C., D., J. A. Ruíz C., J. G. Flores G., D. R. González E. 2006. Distribución espacial del contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco. *Terra* 25: 187-194.
- INEGI. 1982. Carta Edafológica. E14A26. Escala 1: 50 000. Angangueo y Estado de México.
- INEGI. 2000. Carta Geológico- Minera E14A26. Escala 1: 50 000. Angangueo y Estado de México.
- INEGI. 2008. Guía para la Interpretación de Cartografía. Aguascalientes, México. 28pp.
- ISRIC 1995. (Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos). Procedimientos para análisis de suelos. *In*: L. P. van Reeuwijk (ed). *Procedures for Soil Analysis*. Ma. Del C. Gutiérrez C., C. A. Tavarez E. y C. A. Ortiz S. (trads.). Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- IUSS-ISRIC-FAO (WRB). 2007. Base referencial Mundial del Recurso Suelo. Traducción al español de M. S. Pazos. *Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos*. No. 103. FAO, Roma.
- Jastrow J.D. and R.M. Miller. 1998. Contributions of Interacting Biological Mechanisms to Soil Aggregate Stabilization in Restored Prairie. *ELSEVIER*. 30(7): 905-916.
- Juárez B. 2012. *Mecánica de Suelos: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. Ed. Limusa. México 641pp.
- Kraemer, F.B., P.L. Fernández., M.G. Castiglioni y H.J.M. Morrás. 2012. Evaluación del Tiempo de Inmersión de los Agregados en el Tratamiento de Humedecimiento Rápido de la Técnica de Le Bissonnais. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Knoblich, K., E. Mands y S. Kussmaul. 1996. Estudios Mineralógicos y Físico-Mecánicos en Rocas Volcánicas Meteorizadas del Valle Central de Costa Rica. – *Rev. Geol. América Central*, 19(20): 175-181.
- Le Bissonnais Y. and C. Le Souder. 1995. Mesurer la Stabilité Structurale des Sols pour Évaluer Leur Sensibilité à la Battance et à l'érosion. *Étude et Gestion des Sols*, 2 (1): 43-56.
- Lobo L.D y M. Pulido M. 2006. Métodos e Índices para Evaluar la Estabilidad Estructural de los Suelos. *Revista Venesuelos*. Vol.14 (1): 22-73.
- Martinez-Trinidad S., H. Cotler., J. D. Etchevers-Barra., V. M. Ordaz-Chaparro y F. de León-González. 2008. Efecto del Manejo en la Agregación del Suelo en un Ecosistema Tropical Seco. *Terra Latinoamericana* 26:299-307.
- Meza P. G. y Geissert K. D. 2003. Estructura, Agregación y Porosidad en Suelos Forestales y Cultivados de Origen Volcanico del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 5(2): 57-60.

- Meza-Pérez E. y Geissert- Kientz, D. 2006. Estabilidad de Estructura en Andisoles de Uso Forestal y Cultivados. *Terra Latinoamericana*. Vol. 24:2:163-170.
- Mitchell, J. K. 1993. *Fundamentals of Soil Behavior*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Mineral Powder Diffraction File. 1980. Data Book. JC POS. International Centre for Diffraction Data. Pennsylvania, U.S.A.
- Mizota, C. y L. P. van Reeuwijk. 1989. *Clay Mineralogy and Chemistry of Soils Formed in Volcanic Material in Diverse Climatic Regions*. Soil Monograph 2. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Montenegro G., H. 1991. Interpretación de las Propiedades Físicas del Suelo (Textura, Estructura, Densidad, Aireación, etc). En: Seminario-Taller "Fundamentos para la interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para Riego". Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá D.E. Colombia.
- Narro F., E. 1994. *Física de Suelos con Enfoque Agrícola*. Ed. Trillas, S.A de C.V.
- NOM (Norma Oficial Mexicana. Diario oficial de la federación). 2003 (23 de abril). NOM-023-SEMARNAT-2001. p 73.
- Oades J.M. 1984. Soil Organic Matter and Structural Stability: Mechanisms and Implications for Management. *Plant and Soil*. 76: 319-337.
- Ortega, T. E. 1981. *Química de Suelos*. Universidad Autonoma de Chapingo. Chapingo, México.
- Ortiz, S. C. A., D. Pájaro H. y M. C. Gutiérrez C. 1994. Introducción a la Leyenda del Mapa Mundial de Suelos FAO/UNESCO, versión 1988. Cuaderno de Edafología 20. Instituto de Recursos Naturales, Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillo, Méx. p 40.
- Parfitt, R. L. 1980. Chemical Properties of Variable Charge Soils. pp. 169-193. *In*: K. G. Theng (ed). *Soils With Variable Charge*, New Zealand Society of Soil Science, Lower Hutt, N. Z.
- Parfitt, R. L. 1990. Allophane in New Zealand: A review. *Aust. J. Soil Sci.* 28: 343-360.
- Parfitt, R. L. y B. Clayden. 1991. Andisols: The Development of a New Order in Soil Taxonomy. *Geoderma* 49: 181-198.
- Pasquarè G., L. Ferrari, V. H. Garduño, A. Tibaldi, L. Vezzoli. 1991. Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacán; Boulder, Co. *Geological Society of America*, Map and Chart series, MCH072. 20 pp.
- Pepe, Th. Y Lager. 1994. *Manual for soil Description and Clasification*. Departamento of Soil Sciencia and Geology, Wegeningen Agricultural University. Wageningen, Netherlands.
- Porta C., J., M. López-Acevedo R. y C. Roquero de L. 1999. *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 2a ed. Mundi-Prensa, España.
- Porta C., J., M. López - Acevedo R. y C. Roquero de L. 2003. *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3ª ed. Mundi – Prensa, España. 849pp.

- Pulido-Moncada M.A., D. Lobo-Luján y Z. Lozano-Pérez. 2009. Asociación entre Indicadores de Estabilidad Estructural y la Materia Orgánica en Suelos agrícolas de Venezuela. *Agrociencias* 43:221-230.
- Ramírez R. M. I. 2001. Los Espacios Forestales de la Sierra de Angangueo (Estados de Michoacán y México), México: Una Revisión Geográfica. Tesis de doctorado. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Geografía e Historia. Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física.
- Ramírez, J. C. y F. Gallardo. 2012. Estacionalidad del Grado de Humectación de un Andisol con Diferentes Usos Silvoagropecuarios. *In: Memorias de resúmenes del congreso Latinoamérica unida protegiendo sus suelos. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.*
- Rodríguez, T., S., A. 1999. Procesos de Intemperismo en Tepetates y su Influencia en la Formación de Suelos. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillo, Texcoco, Edo de México. 144 pp.
- Rozas L. J.L. 2010. Diccionario de Términos Edafológicos Tomo I. Edita, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Secretaría General Técnica, S.A. 544 pp.
- Rzedowski, J. 1991. El endemismo en la flora fanerogámica mexicana: una apreciación analítica preliminar. *Acta Botánica Mexicana*, N° 15. 447-64 pp.
- Rzedowski, G. C. de, J. Rzedowski. 2005. Flora Fanerogámica del Valle de México. 2ª ed. Instituto de Ecología, A. C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro, Mich. 1406 pp.
- Schwertmann, U. 1966. Inhibitory effect of soil organic matter in the crystallization by amorphous ferric hydroxide. *Nature*. 212:645-646.
- Schwertmann, U. y R. M. Taylor. 1989. Iron oxides. pp. 379-438. *In: J.B. Dixon y S.B. Weed (Eds). Minerals in soil environment. 2nd ed. Soil Sci. Soc. Am. Book Ser. 1. Madison WI, USA.*
- Shoji, S., Masami N., Randy D. 1993. Volcanic ash Soils. (Genesis, properties and utilization). *Developments in Soil. Science* 21. Elsevier. 288pp.
- Shoji, S., M. Nanzio, R. A. Dahlgren y P. Quantin. 1996. Evaluation and proposed revisions of criteria for Andosols in the world reference base for soil resources. *Soil Sci.* 161: 605-615.
- Shoji, S. y Y. Fujiwara. 1984. Active Aluminium and Iron in the Humus Horizons of Andosols from Northeastern Japan: Their Forms, Properties, and Significance in Clay Weathering. *Soil Science*. 137:216-226.
- Soil Survey Investigations. 1992. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Report 42. United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service. National Soil Survey Center. Washington, D. C.

- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2nd ed. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Agriculture Handbook 436. Washington, D. C.
- Soil Survey Staff. 2010. Claves para la Taxonomía de Suelos. *Traducción al español de:* Carlos A. Ortiz-Solorio, Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena y Edgar V. Gutiérrez-Castorena. Undécima Edición. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. 331 pp.
- Soriano M.D., A. Calvo., C. Boix y V. Pons. 1996. Variaciones en las Propiedades de los Suelos y su Agregación en un Transecto Altitudinal de la Provincia de Alicante. Cuaternario y Geomorfología, 10(1-2): 45-58.
- Statistical Graphics, Corp. 2001. Statgraphics Plus v.5.1 for Windows, Rockville, MD.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M., 1982. Organic Matter and Water-Stable Aggregates in Soils. Journal of Soil Science. 33: 141–163.
- Wada, K. 1977. Allophane and Imogolite. pp. 603-638. *In:* J. B. Dixon and S. B. Weed (Eds). Minerals in Soil Environments. Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wisc.
- Wada, K. 1980. Mineralogical characteristics of Andisols. pp. 87-107. *In:* K. G. Theng (ed.). Soils with variable charge, New Zealand Society of Soil Science, Lower Hutt, N. Z.
- Whitten D. G. A. y Brooks, J. R. 1980. Diccionario de geología. Madrid: Alianza Editorial.
- Yamada, I., Shoji, S. Kobayashi y J. Masui. 1975. Chemical and mineralogy studies of volcanic ashes. Relationship between rock types and mineralogic properties of volcanic ashes. Soil Sci. Plant Nutr 21:319-326.
- Yoder, R. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Amer. Soc. Agron.*, 28: 337-351.

# ANEXOS

## Anexo 1

### DESCRIPCIÓN DEL SITIO 1

Descrito por: Martha Olivia Cortés Vargas, María Alcalá de Jesús.  
 Localización: Cañada del Cajón del Cerro "El cacique".  
 Deslizamiento con orientación este. Fecha: 01 de Octubre de 2010.  
 Localidad: Sector Sur de Zitacuaro, Mich.  
 Coordenadas: latitud norte 19°23'38.9" y longitud oeste 100°18'15.0"  
 Altitud: 2596 m Relieve: Ladera parte media Pendiente: 60%.  
 Drenaje superficial: sitio donador. Microrrelieve: accidentado.  
 Material parental: colapsos de domos Drenaje: Sitio donador.  
 Pedregosidad: > 75% de grandes a pequeñas (1-20 cm).  
 Vegetación: arbórea (pino-encino) y arbustiva (30 m y 50 cm).  
 Condiciones meteorológicas: día despejado y soleado.  
 Uso del suelo: Forestal. Profundidad del corte de suelo: 170 cm.



### DESCRIPCIÓN DEL PERFIL 1

| Horizonte | Descripción  |
|-----------|--|
| A         | 0-22 cm, color en húmedo very dark brown (10YR 2/2); húmedo; textura franco arenosa; estructura granular y pequeños bloques subangulares sueltos con débil desarrollo; consistencia extremadamente friable; abundantes piedras grandes (50-75%); permeabilidad rápida a moderada; raíces muy abundantes (finas) y comunes (delgadas); nula reacción al HCl y tenue al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; presencia de fauna; transición al siguiente horizonte media e irregular por color. |
| A2        | 22-65 cm, color en húmedo dark brown (7.5YR 3/2); húmedo; textura franco arenosa; estructura pocos y pequeños bloques subangulares débilmente desarrollados; consistencia extremadamente friable; abundantes piedras grandes (50-75%); permeabilidad rápida a moderada; raíces comunes y finas; nula reacción al HCl y tenue al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte media e irregular por color tenue.   |
| A3        | 65-110 cm, color en húmedo dark brown (7.5YR 3/2); húmedo; textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares débilmente desarrollados; consistencia muy friable; abundantes piedras grandes (50-75%); permeabilidad rápida; raíces comunes y raras; nula reacción al HCl y tenue al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte ondulada media e irregular.   |
| C         | 110-170 cm, color en húmedo dark gray (7.5YR 4/1); húmedo; textura arenosa; sin estructura debido al exceso de gravas y piedras pequeñas; permeabilidad rápida; pocas raíces y raras; nula reacción al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .   |

Pedregosidad (Ø cm): sin piedras, gravas (2 mm a 1 cm), piedras pequeñas (1 a 5), medias (5 a 10), grandes (10 a 20), muy grandes (> 20).

Raíces en 3 dm<sup>2</sup>: muy raras (<1), raras (3 a 5), pocas (5 a 10), comunes (10 a 100), abundantes (100 a 500), extremadamente abundantes (> 500). Tamaño en Ø mm: finas (<1), delgadas (1 a 3), medias (3 a 10), gruesas (10 a 30), muy gruesas (> 30).

**DATOS DE LABORATORIO DEL PERFIL 1.**

**Análisis Físico y Químico. "Cañada del Cajón". Sector sur de Zitácuaro, Mich.**

| Horiz | Prof.   | Humedad | Textura |      |     |      |      |      | Clase de Textura | Dap                | Color     |           |
|-------|---------|---------|---------|------|-----|------|------|------|------------------|--------------------|-----------|-----------|
|       |         |         | A       | L    | R   | LG   | LF   | A+LG |                  |                    | Seco      | Húmedo    |
|       | cm      | %       | -       | %    | -   | -    | -    | -    |                  | g cm <sup>-3</sup> |           |           |
| A     | 0-22    | 56.3    | 32.6    | 63.5 | 4.0 | 44.9 | 18.6 | 77.4 | FL               | 0.58               | 7.5YR 4/2 | 7.5YR 3/1 |
| A2    | 22-65   | 50.2    | 33.6    | 58.8 | 7.6 | 41.8 | 17.0 | 75.4 | FL               | 0.70               | 10YR 5/3  | 7.5YR 3/2 |
| A3    | 65-110  | 46.1    | 33.5    | 59.0 | 7.6 | 36.0 | 23.0 | 69.4 | FL               | 0.70               | 10YR 5/3  | 7.5YR 3/2 |
| C     | 110-170 | 36.7    | 36.1    | 56.4 | 7.6 | 41.4 | 15.0 | 77.4 | FL               | 0.89               | 10YR 5/3  | 7.5YR 3/1 |

| Horiz | pH (H <sub>2</sub> O) |     | pH (KCl) | pH (NaF) | C.E   | C.O | M.O  | Bases intercambiables    |                  |                |                 | SUM  | CIC  | SB   | RF |
|-------|-----------------------|-----|----------|----------|-------|-----|------|--------------------------|------------------|----------------|-----------------|------|------|------|----|
|       | 1:2.5                 | 1:5 | 1:2.5    | 1:50     |       |     |      | Ca <sup>++</sup>         | Mg <sup>++</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> |      |      |      |    |
|       |                       |     |          |          | µS/cm | %   | %    | cmol(+) kg <sup>-1</sup> |                  |                |                 |      |      |      | %  |
| A     | 5.9                   | 6.0 | 5.1      | 11.47    | 33.2  | 9.4 | 16.3 | 2.77                     | 0.23             | 0.02           | 0.04            | 3.0  | 32.4 | 9.4  | 91 |
| A2    | 6.0                   | 6.2 | 5.2      | 11.48    | 16.4  | 6.4 | 11.0 | 3.61                     | 0.20             | 0.01           | 0.06            | 3.9  | 29.3 | 13.2 | 90 |
| A3    | 6.1                   | 6.3 | 5.4      | 11.47    | 16.5  | 6.6 | 11.3 | 4.91                     | 0.16             | 0.01           | 0.04            | 5.1  | 19.5 | 26.2 | 91 |
| C     | 6.2                   | 6.3 | 5.5      | 11.48    | 14.6  | 5.5 | 9.5  | 2.67                     | 0.15             | 0.02           | 0.04            | 2.29 | 29.3 | 9.8  | 84 |

Horiz = símbolo del horizonte; A = arena; L = limo; R = arcilla; LG = limo grueso; LF = limo fino; FL = franco limoso; Dap = densidad aparente; C.E = conductividad eléctrica; C.O = carbono orgánico; M.O = materia orgánica; SUM = suma de bases intercambiables; CIC = capacidad de intercambio catiónico; SB = saturación de bases; RF = retención de fosfato.

**Análisis por disolución selectiva, minerales secundarios amorfos y minerales primarios.**

| Horiz | O X A |      |      | Ald  | D I T |      | P I R |      | Alo + 1/2Feo | Alo-Alpy Sio | Alo Sio | Sio Alo |
|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|------|--------------|--------------|---------|---------|
|       | Alo   | Feo  | Sio  |      | Fed   | Sid  | Alpy  | Fepy |              |              |         |         |
|       | %     |      |      |      |       |      |       |      |              |              |         |         |
| A     | 3.27  | 0.31 | 0.89 | 1.12 | 0.15  | 0.07 | 1.00  | 0.24 | 3.42         | 2.55         | 3.68    | 0.27    |
| A2    | 4.17  | 0.40 | 1.86 | 0.88 | 0.11  | 0.20 | 0.90  | 0.16 | 4.37         | 1.76         | 2.24    | 0.45    |
| A3    | 4.40  | 0.36 | 2.30 | 0.75 | 0.09  | 0.08 | 0.63  | 0.09 | 4.59         | 1.64         | 1.91    | 0.52    |
| C     | 4.04  | 0.31 | 1.83 | 0.66 | 0.08  | 0.05 | 0.70  | 0.05 | 4.20         | 1.82         | 2.21    | 0.45    |

| Horiz | Alpy | Fepy | Feo  | Alpy | ALO+IMO | ALO   | IMO  | FER  | V V |  |
|-------|------|------|------|------|---------|-------|------|------|-----|--|
|       | Ald  | Fed  | Fed  | Alo  |         |       |      |      |     |  |
|       | %    |      |      |      |         |       |      |      |     |  |
| A     | 0.90 | 1.58 | 2.04 | 0.30 | 7.10    | 10.40 | 0.00 | 0.53 | Np  |  |
| A2    | 1.02 | 1.41 | 3.56 | 0.21 | 14.88   | 14.43 | 0.45 | 0.68 | Np  |  |
| A3    | 0.85 | 1.01 | 4.18 | 0.14 | 18.40   | 15.04 | 3.36 | 0.62 | Np  |  |
| C     | 1.07 | 0.73 | 4.13 | 0.17 | 14.64   | 14.09 | 0.55 | 0.53 | Np  |  |

Alo, Feo y Sio = aluminio, hierro y silicio extraídos con oxalato ácido; Ald, Fed y Sid = extraídos con ditionito citrato bicarbonato; Alpy y Fepy = extraídos con pirofosfato de sodio; ALO = alófano; IMO = imogolita; FER = ferrihidrita; V V = no presente; Np = no presente.

## DESCRIPCIÓN DEL SITIO 2

Descrito por: Martha Olivia Cortés Vargas, María Alcalá de Jesús.

Localización: "Cerro del Campanario".

A 15 kilómetros del poblado El Rosario. Fecha: 2 de octubre del 2010

Localidad: "El Rosario" Mpio. de Ocampo, Mich.

Coordenadas: latitud norte 19°35'37.9" y longitud oeste 100°15'25.7"

Altitud: 3,444 m Relieve: recto (cóncavo-convexo por deslizamiento)

Drenaje superficial: sitio normal. Microrrelieve: accidentado y ondulado

Posición fisiográfica: tierra alta Pendiente: 45%

Vegetación: bosque de oyamel de cobertura densa.

Fauna: serpiente de cascabel, ardillas y conejos de monte.

Condiciones meteorológicas: día despejado y soleado.

Uso del suelo: forestal. Profundidad del corte de suelo: 190 cm

Nombre del guía: José Ángel.



## DESCRIPCIÓN DEL PERFIL 2

| Horizonte | Descripción  |
|-----------|--|
| 0-20 cm   | color en húmedo Black (7.5YR 2.5/1); húmedo; textura limo arcillosa; estructura en bloques subangulares y granular de moderado desarrollo; consistencia friable; poros únicamente los que se forman por raíces; permeabilidad moderada; raíces delgadas, comunes y muy raras; hay presencia de lombrices; presencia de carbón vegetal suelto; reacción nula al HCl y tenue al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte media horizontal por dureza. |
| A         |  |
| 20-51 cm  | color en húmedo Black (7.5YR 2.5/1); húmedo; textura limo arcillosa; estructura en bloques subangulares y granular de moderado desarrollo; consistencia friable; permeabilidad moderada; raíces delgadas comunes y muy raras; hay un manchón de material muy intemperizado color crema con un diámetro aproximado de 10X10 cm; reacción nula al HCl y tenue al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte media y horizontal por dureza.              |
| A2        |  |
| 51-65 cm  | color en húmedo Black (7.5YR 2.5/1); húmedo; textura limo arcillosa; estructura en bloques subangulares y granular de moderado desarrollo; consistencia friable; permeabilidad moderada; raíces gruesas y delgadas, comunes y raras; reacción nula al HCl y tenue H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte horizontal media por dureza y color.   |
| A3        |  |
| 65-83 cm  | color en húmedo Black (7.5YR 2.5/1); húmedo; textura franco limosa; estructura columnar de moderado desarrollo que se rompe el bloques subangulares pequeños, en los agregados se observan raíces oxidadas (finas) y micelios agrupados (muy finos); consistencia friable; permeabilidad moderada; raíces comunes y raras; reacción nula al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte media y ondulada por dureza.                             |
| AC        |  |
| 83-95 cm  | color en húmedo very dark gray (7.5 YR 3/1); húmedo; textura franco limosa; estructura en bloques subangulares de moderado desarrollo; consistencia firme; permeabilidad moderada; pocas raíces; reacción nula al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte media y ondulada por dureza.   |
| C         |  |

Pedregosidad (Ø cm): sin piedras, gravas (2 mm a 1 cm), piedras pequeñas (1 a 5), medias (5 a 10), grandes (10 a 20), muy grandes (> 20).

Raíces en 3 dm<sup>2</sup>: muy raras (<1), raras (3 a 5), pocas (5 a 10), comunes (10 a 100), abundantes (100 a 500), extremadamente abundantes (> 500). Tamaño en Ø mm: finas (<1), delgadas (1 a 3), medias (3 a 10), gruesas (10 a 30), muy gruesas (> 30).

*Continuación. Descripción del Perfil 2*

| Horizonte | Descripción   |
|-----------|---|
| C2        | 95-117 cm, color en húmedo very dark gray (7.5 YR 3/1); húmedo; textura limo arcillosa; estructura columnar y bloques subangulares de moderado desarrollo; consistencia firme; permeabilidad moderada; raíces raras; reacción nula al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte irregular marcada por dureza y color. |
| 2AC       | 117-144 cm, color en Black (7.5YR 2.5/1); húmedo; textura franca; estructura columnar y bloques subangulares de moderado desarrollo; consistencia firme; permeabilidad moderada; raíces raras y muy raras; reacción nula al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> . Transición al siguiente horizonte ondulada media e irregular por color.           |
| C         | 144-190 cm, color en húmedo light yellowish brown (2.5 Y 6/4); húmedo; textura limo arcillosa; estructura en bloques subangulares fuertemente desarrollados; consistencia firme; permeabilidad lenta; raíces muy raras y finas; reacción nula al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .  |

**DATOS DE LABORATORIO DEL PERFIL 2.**

Análisis Físico y Químico. "Cerro del Campanario". El Rosario, Mpio. Ocampo, Mich.

| Horiz | Prof.   | Humedad | Textura |      |      |      |      |      | Clase de Textura   | Dap  | Color       |             |
|-------|---------|---------|---------|------|------|------|------|------|--------------------|------|-------------|-------------|
|       |         |         | A       | L    | R    | LG   | LF   | A+LG |                    |      | Seco        | Húmedo      |
|       | cm      | %       | -       | %    | -    | -    | -    | -    | g cm <sup>-3</sup> |      |             |             |
| A     | 0-20    | 59.7    | 18.6    | 71.1 | 10.4 | 41.9 | 29.2 | 60.4 | FL                 | 0.65 | 10YR 4/2    | 7.5YR 2.5/1 |
| A2    | 20-51   | 59.4    | 18.9    | 68.3 | 12.8 | 36.5 | 31.8 | 55.4 | FL                 | 0.72 | 10YR 4/2    | 7.5YR 2.5/1 |
| A3    | 51-65   | 53.2    | 18.4    | 64.9 | 16.8 | 38.1 | 26.8 | 56.4 | FL                 | 0.65 | 10YR 4/1    | 7.5YR 2.5/1 |
| AC    | 65-83   | 59.2    | 19.7    | 57.6 | 22.8 | 31.8 | 25.8 | 51.4 | FL                 | 0.81 | 10YR 4/1    | 7.5YR 2.5/1 |
| C     | 83-95   | 35.8    | 16.8    | 60.4 | 22.8 | 32.6 | 27.8 | 49.4 | FL                 | 0.9  | 10YR 5/1    | 7.5YR 3/1   |
| C2    | 95-117  | 32.9    | 20.9    | 55.2 | 24.0 | 32.6 | 22.6 | 53.4 | FL                 | 1.32 | 10YR 5/1    | 7.5YR 3/1   |
| 2AC   | 117-144 | 32.5    | 26.1    | 69.5 | 4.4  | 54.3 | 15.2 | 80.4 | FL                 | 0.94 | 7.5YR 2.5/1 | 7.5YR 2.5/1 |
| C     | 144-190 | 33.3    | 33.9    | 53.8 | 12.4 | 42.6 | 11.2 | 76.4 | FL                 | 0.94 | 2.5Y 7/3    | 2.5Y 6/4    |

| Horiz | pH (H <sub>2</sub> O) |     | pH (KCl) | pH (NaF) | C.E   | C.O | M.O  | Bases intercambiables    |                  |                |                 | SUM  | CIC  | SB   | RF |
|-------|-----------------------|-----|----------|----------|-------|-----|------|--------------------------|------------------|----------------|-----------------|------|------|------|----|
|       | 1:2.5                 | 1:5 | 1:2.5    | 1:50     |       |     |      | Ca <sup>++</sup>         | Mg <sup>++</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> |      |      |      |    |
|       |                       |     |          |          | μS/cm | %   | %    | cmol(+) kg <sup>-1</sup> |                  |                |                 |      |      |      | %  |
| A     | 5.6                   | 5.9 | 4.6      | 10.8     | 34.3  | 6.9 | 12.0 | 0.36                     | 0.46             | 0.42           | 0.06            | 0.9  | 22.4 | 3.9  | 72 |
| A2    | 5.9                   | 6.1 | 5.8      | 10.6     | 26.3  | 7.6 | 13.2 | 2.69                     | 0.61             | 0.47           | 0.06            | 3.4  | 43.7 | 7.7  | 71 |
| A3    | 5.9                   | 6.1 | 4.7      | 10.5     | 28.7  | 4.6 | 7.9  | 9.84                     | 3.38             | 0.41           | 0.11            | 13.3 | 18.6 | 71.4 | 70 |
| AC    | 5.9                   | 6.1 | 4.8      | 10.5     | 27.0  | 3.7 | 6.3  | 1.81                     | 0.72             | 0.28           | 0.09            | 2.6  | 43.9 | 6.0  | 63 |
| C     | 6.0                   | 6.2 | 4.6      | 9.6      | 25.4  | 3.1 | 5.4  | 19.8                     | 0.52             | 0.29           | 0.17            | 20.5 | 21.8 | 93.7 | 32 |
| C2    | 6.2                   | 6.3 | 4.7      | 8.4      | 15.9  | 2.7 | 4.6  | 3.38                     | 1.36             | 0.20           | 0.15            | 4.9  | 44.0 | 11.1 | 0  |
| 2AC   | 5.5                   | 5.8 | 4.5      | 11.9     | 8.6   | 7.3 | 12.6 | 2.55                     | 1.45             | 0.04           | 0.04            | 4.0  | 31.1 | 13.0 | 99 |
| C     | 6.5                   | 6.8 | 4.8      | 9.1      | 20.4  | 0.3 | 0.5  | 5.05                     | 0.24             | 0.13           | 0.21            | 5.5  | 52.4 | 10.5 | 0  |

Horiz = símbolo del horizonte; A = arena; L = limo; R = arcilla; LG = limo grueso; LF = limo fino; FL = franco limoso; Dap = densidad aparente; C.E = conductividad eléctrica; C.O = carbono orgánico; M.O = materia orgánica; SUM = suma de bases intercambiables; CIC = capacidad de intercambio catiónico; SB = saturación de bases; RF = retención de fosfatos.

Análisis por disolución selectiva, minerales secundarios amorfos y minerales primarios.

| Horiz | O X A |      |      | D I T |      |      | P I R |      | Alo + 1/2Feo | Alo-Alpy Sio | Alo Sio | Sio Alo |
|-------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|--------------|--------------|---------|---------|
|       | Alo   | Feo  | Sio  | Ald   | Fed  | Sid  | Alpy  | Fepy |              |              |         |         |
|       | %     |      |      |       |      |      |       |      |              |              |         |         |
| A     | 1.90  | 0.77 | 0.29 | 0.82  | 0.25 | 0.07 | 0.81  | 0.46 | 2.28         | 3.78         | 6.61    | 0.15    |
| A2    | 2.05  | 0.75 | 0.30 | 0.58  | 0.23 | 0.07 | 0.54  | 0.44 | 2.42         | 5.08         | 6.89    | 0.15    |
| A3    | 2.26  | 0.85 | 0.32 | 0.55  | 0.28 | 0.10 | 0.70  | 0.57 | 2.68         | 4.84         | 7.00    | 0.14    |
| AC    | 1.55  | 0.71 | 0.22 | 0.54  | 0.31 | 0.11 | 0.62  | 0.60 | 1.91         | 4.28         | 7.14    | 0.14    |
| C     | 0.95  | 0.60 | 0.07 | 0.28  | 0.23 | 0.04 | 0.53  | 0.50 | 1.25         | 6.10         | 14.01   | 0.07    |
| C2    | 0.42  | 0.50 | 0.01 | 0.11  | 0.12 | 0.03 | 0.27  | 0.24 | 0.67         | 12.20        | 33.84   | 0.03    |
| 2AC   | 4.86  | 2.10 | 1.80 | 2.48  | 0.68 | 0.08 | 1.99  | 1.39 | 5.91         | 1.59         | 2.70    | 0.37    |
| C     | 0.27  | 0.25 | 0.00 | 0.02  | 0.03 | 0.06 | 0.03  | 0.05 | 0.39         | 95.80        | 107.20  | 0.01    |

| Horiz | Alpy Ald | Fepy Fed | Feo Fed | ALO+IMO | ALO   | IMO  | FER  | VV |
|-------|----------|----------|---------|---------|-------|------|------|----|
|       |          |          |         |         |       |      |      |    |
| A     | 0.99     | 1.89     | 3.11    | 2.30    | 4.14  | 0.00 | 1.30 | 22 |
| A2    | 0.94     | 1.90     | 3.21    | 2.38    | 0.00  | 2.38 | 1.27 | 18 |
| A3    | 1.27     | 2.02     | 3.01    | 2.58    | 0.00  | 2.58 | 1.45 | 24 |
| AC    | 1.15     | 1.96     | 2.34    | 1.74    | 0.00  | 1.74 | 1.21 | 29 |
| C     | 1.88     | 2.17     | 2.63    | 0.54    | 0.00  | 0.54 | 1.03 | 11 |
| C2    | 2.46     | 1.98     | 4.14    | 0.10    | 0.00  | 0.10 | 0.84 | 9  |
| 2AC   | 0.80     | 2.06     | 3.12    | 14.40   | 15.27 | 0.00 | 3.58 | Np |
| C     | 1.43     | 1.94     | 9.72    | 0.02    | 0.00  | 0.02 | 0.42 | 2  |

Alo, Feo y Sio = aluminio, hierro y silicio extraídos con oxalato ácido; Ald, Fed y Sid = extraídos con ditionito citrato bicarbonato; Alpy y Fepy = extraídos con pirofosfato de sodio; ALO = alófano; IMO = imogolita; FER = ferrihidrita. Minerales de la fracción arenosa cuantificados sobre la base de 100 granos: VV = vidrio volcánico; Np = no presente.

### DESCRIPCIÓN DEL SITIO 3

Descrito por: Martha Olivia Cortés Vargas, María Alcalá de Jesús.  
 Fecha: 11 de octubre del 2010  
 Localización: Al nor-este del Mpio. de Anganguero. Cerro "El Catingon".  
 Localidad: Mpio de Anganguero.  
 Coordenadas: latitud norte 19°38'6.0" y longitud oeste 100°14'57.7"  
 Altitud: 3,368m Relieve: cóncavo-convexo Pendiente: 45%.  
 Drenaje superficial: sitio normal. Microrrelieve: accidentado.  
 Posición fisiográfica: ladera de cerro parte alta.  
 Material de origen: Andesita con alteración hidrotermal.  
 Vegetación nativa: muy alterada (bosque de oyamel).  
 Fauna: tuzas. Uso del suelo: forestal  
 Condiciones meteorológicas: día soleado.  
 Profundidad del corte de suelo: 125 cm



### DESCRIPCIÓN DEL PERFIL 3

| Horizonte | Descripción  |
|-----------|--|
| A         | 0-23 cm, color en húmedo Black (7.5YR 2.5/1); húmedo; textura limosa; estructura granular (muy gruesa y gruesa) de moderado desarrollo; consistencia friable; permeabilidad moderada; raíces abundantes y raras (delgadas y finas-medias); ligera tixotropía; reacción nula al HCl y tenue al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; presencia lombrices; transición al siguiente horizonte irregular marcado por raíces. |
| A2        | 23-50 cm, color en húmedo Black (7.5YR 2.5/1); húmedo; textura limosa; estructura en bloques subangulares de débil desarrollo; consistencia muy friable; permeabilidad moderada; raíces comunes delgadas y pocas finas; ligera tixotropía; reacción nula al HCl y tenue H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte irregular marcada por color y dureza.                                    |
| C         | 50-80 cm, color en húmedo dark gray (7.5YR 4/1); húmedo; textura limosa; estructura en bloques subangulares de débil desarrollo; consistencia friable; permeabilidad moderada; raíces pocas a raras delgadas a medias; ligera tixotropía; presencia de carbón; reacción nula al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte irregular marcada por color y dureza.                      |
| C2        | 80-125 cm, color en húmedo yellowish brown (10YR 5/4); húmedo; textura limosa; estructura en bloques subangulares débilmente desarrollados; permeabilidad moderada; presencia de carbón; reacción nula al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .  |

Raíces en 3 dm<sup>2</sup>: muy raras (<1), raras (3 a 5), pocas (5 a 10), comunes (10 a 100), abundantes (100 a 500), extremadamente abundantes (> 500). Tamaño en Ø mm: finas (<1), delgadas (1 a 3), medias (3 a 10), gruesas (10 a 30), muy gruesas (> 30).

**DATOS DE LABORATORIO DEL PERFIL 3.**

**Análisis Físico y Químico. Al Nor-Este de Anganguao, Mich.**

| Horiz | Prof.  | Humedad | Textura |      |      |      |      |      | Clase de Textura | Dap                | Color     |              |
|-------|--------|---------|---------|------|------|------|------|------|------------------|--------------------|-----------|--------------|
|       |        |         | A       | L    | R    | LG   | LF   | A+LG |                  |                    | Seco      | Húmedo       |
|       | Cm     | %       | -       | %    | -    | -    | -    | -    |                  | g cm <sup>-3</sup> |           |              |
| A     | 0-23   | 67.8    | 23.0    | 66.7 | 10.4 | 43.5 | 23.2 | 66.4 | FL               | 0.61               | 7.5YR 4/1 | 7.5 YR 2.5/1 |
| A2    | 23-50  | 66.2    | 23.3    | 66.0 | 10.8 | 43.2 | 22.8 | 66.4 | FL               | 0.63               | 7.5YR 4/1 | 7.5 YR 2.5/1 |
| C     | 50-80  | 48.4    | 25.3    | 57.5 | 17.2 | 41.1 | 16.4 | 66.4 | FL               | 0.87               | 7.5YR 6/1 | 10YR 4/2     |
| C2    | 80-125 | 35.8    | 23.6    | 60.1 | 16.4 | 42.9 | 17.2 | 66.4 | FL               | 0.92               | 2.5Y 7/3  | 10YR 5/4     |

| Horiz | pH (H <sub>2</sub> O) |     | pH (KCl) | pH (NaF) | C.E   | C.O | M.O  | Bases intercambiables    |                  |                |                 | SUM  | CIC  | SB   | RF |
|-------|-----------------------|-----|----------|----------|-------|-----|------|--------------------------|------------------|----------------|-----------------|------|------|------|----|
|       | 1:2.5                 | 1:5 | 1:2.5    | 1:50     |       |     |      | Ca <sup>++</sup>         | Mg <sup>++</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> |      |      |      |    |
|       |                       |     |          |          | μS/cm | %   | %    | cmol(+) kg <sup>-1</sup> |                  |                |                 |      |      |      | %  |
| A     | 5.7                   | 5.8 | 4.8      | 11.2     | 69.0  | 9.7 | 16.7 | 9.97                     | 4.22             | 0.32           | 0.06            | 14.3 | 29.1 | 48.9 | 95 |
| A2    | 5.5                   | 5.6 | 4.6      | 11.4     | 37.8  | 5.3 | 9.1  | 17.6                     | 0.49             | 0.19           | 0.02            | 18.2 | 35.5 | 51.2 | 98 |
| C     | 5.5                   | 5.5 | 4.3      | 11.2     | 31.4  | 1.8 | 3.1  | 5.55                     | 0.21             | 0.22           | 0.04            | 5.8  | 22.2 | 26.1 | 94 |
| C2    | 5.6                   | 5.6 | 4.1      | 10.4     | 32.6  | 0.0 | 0.0  | 7.65                     | 0.35             | 0.18           | 0.06            | 8.1  | 29.3 | 27.5 | 67 |

Horiz = símbolo del horizonte; A = arena; L = limo; R = arcilla; LG = limo grueso; LF = limo fino; FL = franco limoso; Dap = densidad aparente; C.E = conductividad eléctrica; C.O = carbono orgánico; M.O = materia orgánica; SUM = suma de bases intercambiables; CIC = capacidad de intercambio catiónico; SB = saturación de bases; RF = retención de fosfatos.

**Análisis por disolución selectiva, minerales secundarios amorfos y minerales primarios.**

| Horiz | O X A |      |      | Ald  | D I T |      |      | P I R |      | Alo + 1/2Feo | Alo-Alpy Sio | Alo Sio | Sio Alo |
|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|--------------|--------------|---------|---------|
|       | Alo   | Feo  | Sio  |      | Fed   | Sid  | Alpy | Fepy  |      |              |              |         |         |
|       | %     |      |      |      |       |      |      |       |      |              |              |         |         |
| A     | 2.10  | 0.73 | 0.38 | 1.20 | 0.26  | 0.13 | 1.00 | 0.47  | 2.33 | 2.48         | 5.20         | 0.19    |         |
| A2    | 2.78  | 0.80 | 0.75 | 1.16 | 0.29  | 0.11 | 1.06 | 0.47  | 3.18 | 2.29         | 3.70         | 0.27    |         |
| C     | 1.97  | 0.55 | 0.55 | 0.74 | 0.20  | 0.07 | 0.43 | 0.29  | 2.25 | 2.82         | 3.60         | 0.28    |         |
| C2    | 0.73  | 0.35 | 0.14 | 0.26 | 0.11  | 0.03 | 0.10 | 0.16  | 0.90 | 4.57         | 5.29         | 0.19    |         |

| Horiz | Alpy | Fepy | Feo  | Alpy | ALO+IMO | ALO   | IMO  | FER  | V V |
|-------|------|------|------|------|---------|-------|------|------|-----|
|       | Ald  | Fed  | Fed  | Alo  |         |       |      |      |     |
|       | %    |      |      |      |         |       |      |      |     |
| A     | 0.86 | 1.78 | 2.78 | 0.47 | 3.02    | 10.75 | 0.00 | 1.24 | 3   |
| A2    | 0.91 | 1.63 | 2.79 | 0.38 | 6.00    | 11.74 | 0.00 | 1.36 | 2   |
| C     | 0.58 | 1.44 | 2.76 | 0.21 | 4.38    | 9.00  | 0.00 | 0.93 | 2   |
| C2    | 0.38 | 1.49 | 3.17 | 0.13 | 1.10    | 0.07  | 1.03 | 0.60 | 3   |

Alo, Feo y Sio = aluminio, hierro y silicio extraídos con oxalato ácido; Ald, Fed y Sid = extraídos con ditionito citrato bicarbonato; Alpy y Fepy = extraídos con pirofosfato de sodio; ALO = alófano; IMO = imogolita; FER = ferrihidrita; V V = vidrio volcánico.

### DESCRIPCIÓN DEL SITIO 4

Descrito por: Martha Olivia Cortés Vargas, María Alcalá de Jesús  
 Localización: "Cerró Guadalupe". Fecha: 1 de noviembre 2010  
 Localidad: Angangueo Mpio. de Ocampo, Mich.  
 Coordenadas: latitud norte 19°37'30.5" y longitud oeste 100°17'14.4"  
 Altitud: 2,855 m Relieve: cóncava y recta Pendiente: 35%.  
 Drenaje superficial: sitio donador. Microrrelieve: accidentado  
 Posición fisiográfica: ladera de cerro parte alta.  
 Material de origen: Andesita con alteración hidrotermal.  
 Vegetación: bosque de encino-pino, matorral y herbáceas.  
 Condiciones meteorológicas: día soleado y por ratos nublado.  
 Observaciones: abundante presencia de cuarzo. Profundidad del corte de suelo: 130 cm.



### DESCRIPCIÓN DEL PERFIL 4

| Horizonte | Descripción   |
|-----------|---|
| A         | 0-5 cm, color en seco brown (7.5YR 4/2); seco; textura franco arenosa; estructura granular (fina y media) de fuerte desarrollo por raíces; consistencia en seco blanda; permeabilidad moderada; raíces comunes y raras (finas y medias); pocas piedras medias de forma subangular; presencia de cuarzo y carbón vegetal ( $\approx 1-2$ mm $\emptyset$ ); reacción nula al HCl y moderada al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte marcada y ondulada por dureza.   |
| A2        | 5-30 cm, color en seco brown (7.5YR 4/2) seco; textura franco limosa; estructura en bloques subangulares (gruesos) de fuerte desarrollo; consistencia en seco blanda; permeabilidad moderada; raíces raras y comunes (delgadas y finas); pocas piedras medias de forma subangular; presencia de cuarzo y carbón vegetal ( $\approx 1$ mm $\emptyset$ ); presencia de fauna (ciempiés) a los 15 cm; reacción nula al HCl y tenue al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte marcada y ondulada por color y dureza. |
| C         | 30-41 cm, color en seco brown (7.5YR 5/2) seco; textura franco limosa; estructura en bloques subangulares (gruesos) de moderado desarrollo; consistencia friable; permeabilidad moderada; raíces pocas y raras (finas y delgadas); material C mezclado con suelo dominando el C, el suelo se está viniendo del horizonte superficial; presencia de cuarzo y carbón vegetal ( $\approx 1$ mm $\emptyset$ ); reacción nula al HCl y tenue al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte marcada y ondulada por color.  |
| C2        | 41-64 cm, color húmedo yellowish brown (10YR 5/4); ligeramente húmedo; textura franca; estructura en bloques subangulares (gruesos) de moderado desarrollo; consistencia muy friable; permeabilidad moderada; pocas raíces (finas y delgadas); pocas piedras medias de forma subangular; presencia de cuarzo y carbón vegetal ( $\approx 1/2$ cm $\emptyset$ ); reacción nula al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte marcada y ondulada por color.  |

Pedregosidad ( $\emptyset$  cm): sin piedras, gravas (2 mm a 1 cm), piedras pequeñas (1 a 5), medias (5 a 10), grandes (10 a 20), muy grandes (> 20).  
 Raíces en 3 dm<sup>2</sup>: muy raras (<1), raras (3 a 5), pocas (5 a 10), comunes (10 a 100), abundantes (100 a 500), extremadamente abundantes (> 500). Tamaño en  $\emptyset$  mm: finas (<1), delgadas (1 a 3), medias (3 a 10), gruesas (10 a 30), muy gruesas (> 30).

*Continuación. Descripción del Perfil 4*

| Horizonte | Descripción  |
|-----------|--|
| C3        | 64-80 cm, color húmedo Sorong brown (7.5YR 4/6); ligeramente húmedo; textura franca; estructura en bloques subangulares (gruesos) de debil desarrollo; consistencia firme; permeabilidad moderada; pocas raíces delgadas; material andesítico muy alterado mezclado con suelo; presencia de cuarzo; reacción nula al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte marcada horizontal por color. |
| C4        | 80-88 cm, color húmedo dark brown (7.5YR 3/4); húmedo; textura franca; estructura en bloques subangulares (gruesos) de moderado desarrollo; consistencia firme; permeabilidad moderada; pocas raíces delgadas; material andesítico muy alterado; presencia de cuarzo y carbón vegetal (≈1-2 mm ø); reacción nula al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte marcada e irregular por color. |
| C5        | 88-130 cm, color húmedo brownish Bellow (10YR 6/6); húmedo; textura franca; estructura en bloques subangulares (gruesos) de fuerte desarrollo; consistencia firme; permeabilidad moderada; raíces pocas y raras (delgadas y gruesas); material andesítico muy alterado mezclado con suelo; presencia de cuarzo y carbón vegetal (≈1/2 cm ø); reacción nula al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .                        |

**DATOS DE LABORATORIO DEL PERFIL 4.**

**Análisis Físico y Químico. "Cerro Guadalupe". Angangueo Mpio. Ocampo, Mich.**

| Horiz | Prof.<br>cm | Humedad<br>% | Textura |      |      |      |      |      | Clase de<br>Textura | Dap<br>g cm <sup>-3</sup> | Color     |             |
|-------|-------------|--------------|---------|------|------|------|------|------|---------------------|---------------------------|-----------|-------------|
|       |             |              | A       | L    | R    | LG   | LF   | A+LG |                     |                           | Seco      | Húmedo      |
| A     | 0-5         | 10.1         | 39.9    | 49.7 | 10.4 | 31.5 | 18.2 | 71.4 | F                   | 0.69                      | 7.5YR 4/2 | 7.5YR 2.5/1 |
| A2    | 5-30        | 10.9         | 33.9    | 53.7 | 12.4 | 36.5 | 17.2 | 70.4 | FL                  | 0.70                      | 7.5YR 4/2 | 7.5YR 2.5/1 |
| C     | 30-41       | 12.4         | 38.4    | 48.4 | 13.2 | 33.0 | 15.4 | 71.4 | F                   | 0.74                      | 7.5YR 5/3 | 7.5YR 3/3   |
| C2    | 41-64       | 15.1         | 35.1    | 50.6 | 14.4 | 39.4 | 11.2 | 74.4 | FL                  | 1.04                      | 10YR 4/6  | 7.5YR 4/4   |
| C3    | 64-80       | 16.7         | 39.6    | 41.7 | 18.8 | 30.9 | 10.8 | 70.4 | F                   | 1.21                      | 10YR 4/6  | 7.5YR 4/6   |
| C4    | 80-88       | 20.1         | 38.9    | 43.2 | 18.0 | 31.6 | 11.6 | 70.4 | F                   | 1.04                      | 10YR 5/4  | 7.5YR 3/3   |
| C5    | 88-130      | 20.1         | 30.1    | 43.9 | 26.0 | 33.3 | 10.6 | 63.4 | F                   | 0.97                      | 10YR 6/6  | 7.5YR 5/6   |

| Horiz | pH (H <sub>2</sub> O) |     | pH (KCl) |      | pH (NaF)         |                  | C.E   | C.O  | M.O  | Bases intercambiables    |                 |      |      | SUM  | CIC | SB | RF |
|-------|-----------------------|-----|----------|------|------------------|------------------|-------|------|------|--------------------------|-----------------|------|------|------|-----|----|----|
|       | 1:2.5                 | 1:5 | 1:2.5    | 1:50 | Ca <sup>++</sup> | Mg <sup>++</sup> |       |      |      | K <sup>+</sup>           | Na <sup>+</sup> |      |      |      |     |    |    |
|       |                       |     |          |      |                  |                  | μS/cm | %    | %    | cmol(+) kg <sup>-1</sup> |                 |      |      |      |     | %  |    |
| A     | 6.2                   | 6.2 | 5.1      | 8.9  | 42.5             | 3.4              | 5.8   | 1.4  | 1.32 | 0.36                     | 0.04            | 2.8  | 20.2 | 13.7 | 27  |    |    |
| A2    | 6.2                   | 6.3 | 5.0      | 8.9  | 30.2             | 1.7              | 3.0   | 0.97 | 1.58 | 0.22                     | 0.02            | 2.6  | 22.7 | 11.3 | 32  |    |    |
| C     | 6.5                   | 6.6 | 5.2      | 8.8  | 25.3             | 1.0              | 1.7   | 0.87 | 0.78 | 0.25                     | 0.11            | 1.8  | 19.3 | 9.1  | 20  |    |    |
| C2    | 6.5                   | 6.7 | 5.2      | 8.8  | 26.6             | 0.6              | 1.1   | 1.78 | 2.37 | 0.14                     | 0.06            | 4.2  | 23.7 | 17.8 | 15  |    |    |
| C3    | 6.5                   | 6.6 | 5.1      | 8.8  | 20.3             | 0.6              | 1.1   | 8.3  | 2.4  | Tz                       | Tz              | 10.7 | 18.5 | 57.7 | 20  |    |    |
| C4    | 6.5                   | 6.6 | 5.1      | 8.7  | 20.1             | 0.6              | 1.1   | 1.33 | 2.71 | 0.22                     | 0.04            | 4.1  | 18.9 | 21.6 | 20  |    |    |
| C5    | 6.5                   | 6.6 | 5.2      | 8.7  | 23.9             | 0.4              | 0.7   | 0.82 | 2.73 | 0.23                     | 0.02            | 3.6  | 12.4 | 28.8 | 9   |    |    |

Horiz = símbolo del horizonte; A = arena; L = limo; R = arcilla; LG = limo grueso; LF = limo fino; FL = franco limoso; Dap = densidad aparente; C.E = conductividad eléctrica; C.O = carbono orgánico; M.O = materia orgánica; SUM = suma de bases intercambiables; CIC = capacidad de intercambio catiónico; SB = saturación de bases; Tz = elementos traza; RF = retención de fosfatos.

**Análisis por disolución selectiva, minerales secundarios amorfos y minerales primarios.**

| Horiz | O X A |      |      | Ald  | D I T |      |      | P I R |      | Alo +<br>1/2Feo | Alo-Alpy<br>Sio | Alo<br>Sio | Sio<br>Alo |
|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|-----------------|-----------------|------------|------------|
|       | Alo   | Feo  | Sio  |      | Fed   | Sid  | Alpy | Fepy  |      |                 |                 |            |            |
|       |       |      |      |      |       |      |      | %     |      |                 |                 |            |            |
| A     | 0.22  | 0.33 | 0.07 | 0.06 | 0.10  | 0.03 | 0.16 | 0.10  | 0.40 | 0.81            | 2.99            | 0.33       |            |
| A2    | 0.32  | 0.40 | 0.05 | 0.05 | 0.11  | 0.03 | 0.16 | 0.11  | 0.52 | 3.01            | 6.02            | 0.17       |            |
| C     | 0.20  | 0.33 | 0.04 | 0.02 | 0.08  | 0.02 | 0.21 | 0.07  | 0.36 | 0.00            | 5.66            | 0.18       |            |
| C2    | 0.09  | 0.23 | 0.02 | 0.03 | 0.04  | 0.03 | 0.19 | 0.06  | 0.21 | 0.00            | 4.13            | 0.24       |            |
| C3    | 0.31  | 0.22 | 0.02 | 0.01 | 0.02  | 0.04 | 0.06 | 0.05  | 0.42 | 16.80           | 20.47           | 0.05       |            |
| C4    | 0.30  | 0.24 | 0.02 | 0.00 | 0.05  | 0.04 | 0.01 | 0.06  | 0.42 | 14.78           | 15.20           | 0.07       |            |
| C5    | 0.15  | 0.18 | 0.02 | 0.01 | 0.03  | 0.04 | 0.09 | 0.03  | 0.24 | 3.40            | 8.51            | 0.12       |            |

| Horiz | Alpy<br>Ald | Fepy<br>Fed | Feo<br>Fed | ALO+IMO | ALO   | IMO  | FER  | VV |
|-------|-------------|-------------|------------|---------|-------|------|------|----|
|       |             |             |            |         |       |      |      |    |
|       |             |             |            |         |       |      |      |    |
| A     | 2.58        | 1.00        | 3.44       | 0.58    | 19.25 | 0.00 | 0.56 | 73 |
| A2    | 3.01        | 1.00        | 3.79       | 0.42    | 8.05  | 0.00 | 0.68 | 89 |
| C     | 11.58       | 0.91        | 4.29       | 0.28    | 23.40 | 0.00 | 0.56 | 84 |
| C2    | 6.76        | 1.59        | 5.94       | 0.18    | 23.40 | 0.00 | 0.39 | 90 |
| C3    | 9.17        | 2.04        | 9.71       | 0.12    | 0.00  | 0.12 | 0.37 | 85 |
| C4    | 0.00        | 1.16        | 5.02       | 0.16    | 0.00  | 0.16 | 0.40 | 52 |
| C5    | 6.28        | 0.89        | 6.10       | 0.14    | 6.06  | 0.00 | 0.31 | 47 |

Alo, Feo y Sio = aluminio, hierro y silicio extraídos con oxalato ácido; Ald, Fed y Sid = extraídos con ditionito citrato bicarbonato; Alpy y Fepy = extraídos con pirofosfato de sodio; ALO = alófano; IMO = imogolita; FER = ferrihidrita. Minerales de la fracción arenosa cuantificados sobre la base de 100 granos: VV = vidrio volcánico; Nd = no determinado.

### DESCRIPCIÓN DEL SITIO 5

Descrito por: Martha Olivia Cortés Vargas, María Alcalá de Jesús.  
 Localización: Cerro "El Melón". Fecha: 1 de noviembre 2010  
 Localidad: Angangueo Mpio. de Ocampo, Mich.  
 Coordenadas: latitud norte 19°37'02.4" y longitud oeste 101°16'44.1".  
 Altitud: 2,752 m Relieve: regular Pendiente: 35%.  
 Drenaje superficial: sitio donador. Microrrelieve: accidentado.  
 Posición fisiográfica: ladera de cerro parte media.  
 Material de origen: andesita muy alterada por proceso hidrotermal.  
 Vegetación: escasos árboles a la orilla del deslizamiento y herbáceas bajas y medias en 50% de la superficie.  
 Erosión: severa en surcos en el área del deslizamiento.  
 Condiciones meteorológicas: día soleado y por ratos nublado. Profundidad del corte de suelo: 97.5 cm.



### DESCRIPCIÓN DEL PERFIL 5

| Horizonte | Descripción   |
|-----------|---|
| A         | 0-17.5 cm, color en seco brown (10YR 4/3); seco; textura franca limosa; estructura en bloques subangulares de fuerte desarrollo y granular de moderado desarrollo; consistencia blanda; permeabilidad moderada; raíces delgadas abundantes y raras; presencia de poco carbón vegetal (4 mm Ø) reacción nula al HCl y tenue al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte ondulada y marcada por color.   |
| C         | 17.5-47.5 cm, color ligeramente húmedo dark brown (7.5YR 3/4); ligeramente húmedo; textura franca limosa; estructura en bloques subangulares y granular de moderado desarrollo; consistencia muy friable; permeabilidad moderada; raíces delgadas pocas y raras; presencia de un escarabajo; presencia de poco carbón vegetal (8 mm Ø); reacción nula al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte ondulada y marcada por color.  |
| 2C        | 47.5-65 cm, color en húmedo strong brown (7.5YR 5/6); húmedo; textura franco arcillosa; estructura masiva con separación de agregados subangulares de débil desarrollo de 2-4 cm de Ø; consistencia muy friable; hay una mancha de color pardo de probable material iluvial del horizonte C (de aprox. 8X20 cm del lado izquierdo y de 6X12 cm lado derecho); permeabilidad moderada; raíces delgadas raras y pocas; presencia de poco carbón vegetal (3-7 mm Ø) reacción nula al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición al siguiente horizonte ondulada y marcada por color. |
| 3C        | 65-97.5 cm, color en húmedo yellowis red (5YR 4/6); húmedo; textura franco arcillosa; estructura masiva con separación de agregados subangulares de débil desarrollo de 2-4 cm de Ø; consistencia muy friable; permeabilidad moderada; raíces delgadas y raras; presencia de una franja de carbón vegetal de 4 mm de ancho por 4 cm de largo; reacción nula al HCl y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .  |

Raíces en 3 dm<sup>2</sup>: muy raras (<1), raras (3 a 5), pocas (5 a 10), comunes (10 a 100), abundantes (100 a 500), extremadamente abundantes (> 500). Tamaño en Ø mm: finas (<1), delgadas (1 a 3), medias (3 a 10), gruesas (10 a 30), muy gruesas (> 30).

**DATOS DE LABORATORIO DEL PERFIL5.**

**Análisis Físico y Químico. "Cerro El Melón". Angangueo, Mpio. Ocampo, Mich.**

| Horiz | Prof.<br>cm | Humedad<br>% | Textura |      |      |      |      |      | Clase de Textura | Dap<br>g cm <sup>-3</sup> | Color     |           |
|-------|-------------|--------------|---------|------|------|------|------|------|------------------|---------------------------|-----------|-----------|
|       |             |              | A       | L    | R    | LG   | LF   | A+LG |                  |                           | Seco      | Húmedo    |
| A     | 0-17.5      | 16.8         | 29.8    | 49.5 | 20.8 | 33.7 | 15.8 | 63.4 | F                | 0.89                      | 10YR 4/3  | 7.5YR 3/2 |
| C     | 17.5-47.5   | 19.7         | 23.9    | 51.7 | 24.4 | 31.5 | 20.2 | 55.4 | FL               | 1.46                      | 7.5YR 4/4 | 7.5YR 3/4 |
| 2C    | 47.5-65     | 25.4         | 27.8    | 51.8 | 20.4 | 32.6 | 19.2 | 60.4 | FL               | 1.39                      | 10YR 7/4  | 7.5YR 5/6 |
| 3C    | 65-97.5     | 25.9         | 21.8    | 45.9 | 32.4 | 28.7 | 17.2 | 50.4 | FR               | 1.38                      | 7.5YR 6/8 | 5YR 4/6   |

| Horiz | pH (H <sub>2</sub> O) |     | pH (KCl) | pH (NaF) | C.E<br>μS/cm | C.O<br>% | M.O<br>% | Bases intercambiables |                  |                |                 | SUM | CIC  | SB<br>% | RF |
|-------|-----------------------|-----|----------|----------|--------------|----------|----------|-----------------------|------------------|----------------|-----------------|-----|------|---------|----|
|       | 1:2.5                 | 1:5 | 1:2.5    | 1:50     |              |          |          | Ca <sup>++</sup>      | Mg <sup>++</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> |     |      |         |    |
| A     | 5.7                   | 5.8 | 4.6      | 9.9      | 22.2         | 3.4      | 5.9      | 1.77                  | 3.94             | 0.20           | 0.02            | 5.7 | 25.8 | 22.2    | 70 |
| C     | 5.4                   | 5.4 | 4.1      | 9.9      | 42.2         | 1.1      | 1.9      | 6.37                  | 0.49             | 0.24           | 0.02            | 6.9 | 14.6 | 47.3    | 65 |
| 2C    | 5.5                   | 5.6 | 4.0      | 9.0      | 39.7         | 0.9      | 1.5      | 6.42                  | 1.43             | 0.02           | 0.04            | 7.9 | 24.6 | 32.1    | 24 |
| 3C    | 5.3                   | 5.4 | 4.1      | 8.8      | 28.4         | 0.4      | 0.7      | 4.74                  | 1.04             | 0.04           | 0.09            | 5.9 | 12.7 | 46.1    | 31 |

Horiz = símbolo del horizonte; A = arena; L = limo; R = arcilla; LG = limo grueso; LF = limo fino; FL = franco limoso; FR = franco arcilloso; Dap = densidad aparente; C.E = conductividad eléctrica; C.O = carbono orgánico; M.O = materia orgánica; SUM = suma de bases intercambiables; CIC = capacidad de intercambio catiónico; SB = saturación de bases; RF = retención de fosfatos.

**Análisis por disolución selectiva, minerales secundarios amorfos y minerales primarios.**

| Horiz | O X A |      |      | Ald  | D I T |      |      | P I R |      | Alo +<br>1/2Feo | Alo-Alpy<br>Sio | Alo<br>Sio | Sio<br>Alo |
|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|-----------------|-----------------|------------|------------|
|       | Alo   | Feo  | Sio  |      | Fed   | Sid  | Alpy | Fepy  |      |                 |                 |            |            |
| A     | 0.69  | 0.48 | 0.11 | 0.41 | 0.15  | 0.04 | 0.28 | 0.21  | 0.93 | 3.65            | 6.17            | 0.16       |            |
| C     | 0.66  | 0.46 | 0.11 | 0.29 | 0.14  | 0.04 | 0.11 | 0.15  | 0.89 | 5.01            | 5.98            | 0.17       |            |
| 2C    | 0.12  | 0.19 | 0.02 | 0.05 | 0.03  | 0.06 | 0.08 | 0.05  | 0.21 | 2.37            | 6.80            | 0.15       |            |
| 3C    | 0.15  | 0.18 | 0.02 | 0.03 | 0.02  | 0.03 | 0.07 | 0.03  | 0.24 | 3.63            | 7.25            | 0.14       |            |

| Horiz | Alpy<br>Ald | Fepy<br>Fed | Feo<br>Fed | ALO+IMO | ALO   | IMO  | FER  | VV |
|-------|-------------|-------------|------------|---------|-------|------|------|----|
|       |             |             |            |         |       |      |      |    |
| A     | 0.69        | 1.36        | 3.15       | 0.90    | 4.77  | 0.00 | 0.81 | 5  |
| C     | 0.37        | 1.02        | 3.20       | 0.88    | 0.00  | 0.88 | 0.78 | 8  |
| 2C    | 1.48        | 2.14        | 7.41       | 0.14    | 11.31 | 0.00 | 0.32 | Nd |
| 3C    | 2.79        | 1.48        | 10.11      | 0.16    | 4.91  | 0.00 | 0.31 | Nd |

Alo, Feo y Sio = aluminio, hierro y silicio extraídos con oxalato ácido; Ald, Fed y Sid = extraídos con ditionito citrato bicarbonato; Alpy y Fepy = extraídos con pirofosfato de sodio; ALO = alófano; IMO = imogolita; FER = ferrihidrita. Minerales de la fracción arenosa cuantificados sobre la base de 100 granos; VV = vidrio volcánico; Nd = no determinado.

## Anexo 2

En este apartado se presentan en general los requerimientos principales de horizontes y propiedades de diagnóstico con base en la WRB (Base Referencial Mundial del Recurso Suelo FAO-ISRIC-SICS, 2007).

### Horizontes de diagnóstico

**Úmbrico** (Del latín *umbra*, sombra). Horizonte con una estructura fuerte como para no ser masivo o muy duro cuando está seco; colores Munsell con una croma menor de 3.5 en húmedo, value más oscuro que 3.5 en húmedo y 5.5 en seco; contenido de carbono orgánico mayor de 0.6%; saturación con bases (SB) menor de 50% y un espesor de 10 cm o más si está sobre *roca continua*; 20 cm o más cuando el suelo tiene menos de 75 cm de espesor ó 25 cm o más cuando el suelo tiene más de 75 cm de espesor. Este horizonte se separa del horizonte mólico solo por el porcentaje de SB al ser mayor de 50%.

### Propiedades de diagnóstico.

**Propiedades ándicas** (Del japonés *an*, oscuro y *do*, suelo). Se refieren al material del suelo que tiene menos de 25% de carbono orgánico, y reúne los siguientes requisitos:  $Al_o$  +  $\frac{1}{2} Fe_o$  de 2.0% o más; densidad aparente menor de  $0.90 \text{ g cm}^{-3}$  y una retención de fosfatos de 85% o más. Las propiedades ándicas se dividen en sil-ándicas y alu-ándicas. Las primeras, tienen sílice extractable en oxalato ácido (pH 3) mayor de 0.6% o una relación de  $Al_{py}/Al_o$  (Al extraído con pirofosfato de sodio y con oxalato ácido) menor de 0.5%, y las segundas,  $Si_o$  (oxalato ácido) menor de 0.6% y  $Al_{py}/Al_o$  mayor de 0.5%.

**Propiedades vítricas** (Del latín *vitrum*, vidrio). Pueden presentarse en una capa superficial y se refieren al material del suelo que tiene 5% o más de vidrio volcánico, agregados vítreos y otros minerales primarios revestidos de vidrio, en la fracción entre 0.05 y 2 mm;  $Al_0 + \frac{1}{2} Fe_0$  de 0.4% o más; una retención de fosfatos de 25% o más; no cumple con uno o más de los criterios de las propiedades *ándicas* y requiere menos del 25% de carbono orgánico.

### Anexo 3

**Requerimientos de las Unidades y Calificadores de los suelos con la WRB (2007).**

**Dístrico (dy).** Tiene una SB menor de 50% en la mayor parte entre 20 y 100 cm de la superficie del suelo. En Leptosoles en una capa de 5 cm ó más de espesor.

**Epidístrico (ed).** Tiene una SB menor de 50% en todo el espesor entre 20 y 50 cm de la superficie del suelo.

**Esquelético (sk).** Tiene 40% o más de gravas u otros fragmentos gruesos en una profundidad de 100 cm de la superficie del suelo.

**Hiperdístrico (hd).** Tiene una SB menor de 50% en todo el espesor entre los primeros 20 y 100 cm del suelo y menos de 20% en alguna parte dentro de los primeros 100 cm del suelo.

**Límico (sl).** Dentro de los primeros 100 cm del suelo tiene una textura limosa, franco limosa, franco arcillo limosa o arcillo limosa en un espesor de 30 cm o más.

**Silándico (sn).** Tiene un espesor acumulado de 15 cm o más con propiedades *ándicas* y un contenido de  $Si_0$  de 0.6% o más; o una relación  $Al_{py}/Al_0$  menor de 0.5% dentro de los primeros 100 cm del suelo.

**Tixotrópico (tp).** Tiene en alguna capa dentro de 50 cm de la superficie del suelo material que cambia, bajo presión o frotando, de un sólido plástico a un estado de licuefacción y vuelve a la condición sólida.

**Úmbrico (um).** Tiene un horizonte úmbrico.

**Vítrico (vi).** Dentro de los primeros 100 cm del suelo tiene un horizonte *vítrico*.