



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
CENTRO DE GEOCIENCIAS

**LOS AGREGADOS DEL SUELO Y SU RELACIÓN CON EL CARBONO ORGÁNICO EN UN  
BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA EN JALPAN, QUERÉTARO**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:  
**MARTHA DANIELA BOBADILLA BALLESTEROS**

TUTOR PRINCIPAL:  
Dra. Norma Eugenia García Calderón  
Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación

COMITÉ TUTOR:

Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena  
Colegio de Postgraduados

Dr. Bruno Manuel Chávez Vergara  
Instituto de Geología

Cd. Mx. Octubre, 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

*Dedicada a mi familia y amigos.*

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer de forma especial a la Dra. Norma E. García Calderón por su guía, asesoría e impulso en mi desarrollo profesional y personal, así como sus infinitas enseñanzas y valiosas discusiones que me han formado durante el desarrollo de este proyecto.

A la M. en C. Elizabeth Fuentes Romero por su apoyo en el muestreo del sitio, su asesoría durante el trabajo de laboratorio, así como por sus recomendaciones y apoyo personal.

Al Dr. Bruno Chávez Vergara y a la Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena por formar parte de mi comité tutor, por las múltiples asesorías brindadas y las horas invertidas en el análisis de resultados durante la realización de la tesis.

A la Dra. Blanca Lucía Prado Pano por darse el tiempo para revisar mi tesis, hacer las observaciones y correcciones adecuadas para la mejora del trabajo.

Agradezco al Técnico Pedro Torres Flores del Laboratorio de Génesis del Colegio de Postgraduados por la elaboración de las láminas delgadas utilizadas en el proyecto.

A la M. en C. María Carolina Muñoz Torres y al Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Centro de Geociencias de la UNAM, por la realización del análisis de bases intercambiables en la solución del suelo.

Agradezco a la Dra. Beatriz E. Marín Castro por su enseñanza y apoyo en la realización del método experimental y el análisis estadístico.

A la M. en I. Carolina Denisse Villalobos Román y al T.S.U. Josué Rico por el apoyo en el trabajo de laboratorio realizado en el Laboratorio de Conservación y Degradación de los Recursos Edáficos de la UMDI-FC.

Agradezco al proyecto PAPIIT IN121320 “Almacenes y flujos de carbono y agua en suelos de bosques mesófilos de montaña con diferentes grados de perturbación” por el financiamiento otorgado para la realización de la tesis.

También agradezco a mi familia, principalmente a Emmanuel y Yuli por apoyarme durante los meses de encierro que fueron caóticos, pero mejoraron con su paciencia y empatía.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a mis amigos de años Xochitl, Fer, Charly, Eder, Carlos, Erika y Ale, así como a los nuevos amigos que me brindó el posgrado Caro Villalobos, Caro Palazuelos, Leila, Edwin y Rubén por la compañía, las risas, la empatía y motivación para seguir en el camino. También quiero agradecer a Lucía Novoa y a Juno por su amor y compañía.

# Indice

Resumen.....	1
Capítulo I .....	2
1.1 Introducción .....	2
1.2 Marco Teórico.....	3
1.2.1 Agregación.....	3
1.2.2 Materia orgánica y Carbono orgánico del suelo .....	6
1.2.3 Bosques Mesófilos de Montaña .....	8
1.3 Planteamiento del problema .....	10
1.3.1 Pregunta .....	10
1.4 Justificación .....	10
1.5 Objetivos.....	11
1.5.1 Objetivo general .....	11
1.5.2 Objetivos particulares.....	11
1.6 Hipótesis .....	11
Capitulo II.....	12
2. Sitio de Estudio .....	12
2.1 Geología.....	12
2.2 Fisiografía .....	13
2.3 Vegetación y uso de suelo .....	13
2.4 Clima.....	13
2.5 Edafología.....	14
Capitulo III.....	15
3.1 Métodos.....	15
3.1.1 Diseño experimental y trabajo de campo.....	15
3.2 Trabajo de laboratorio .....	15
3.2.1 Caracterización de propiedades físicas y químicas del suelo.....	15
3.2.2 Densidad aparente por el método de cilindro.....	15
3.2.3 pH en agua destilada y KCl .....	16
3.2.4 Nitrógeno por Kjeldahl .....	16
3.2.5 Saturación de bases y capacidad de intercambio catiónico (CIC) .....	16
3.2.6 Textura .....	17
3.2.7 Estabilidad de agregados .....	18
3.2.8 Separación de la Materia Orgánica Particulada intra-agregados.....	19
3.2.9 Cuantificación de carbono orgánico del suelo (COS) .....	19

3.3 Fraccionamiento del CO .....	20
3.3.1 Extracción de Ácidos Húmicos (AH) y Ácidos Fúlvicos (AF) del suelo.....	20
3.4 Análisis micromorfológico .....	21
3.5 Clasificación de suelos .....	21
3.6 Análisis estadístico .....	21
Capitulo IV.....	22
4.1 Resultados.....	22
4.1.1 Procesos edafogénicos y clasificación del suelo.....	22
4.2 Micromorfología .....	28
4.2.1 Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic)- Pastizal.....	28
<b>4.2.2 Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic, Hyperhumic)-Acahual .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2.3 Follic Cambic Mollic Umbrisol (Clayic, Hyperhumic)- Bosque.....</b>	<b>32</b>
4.3 Estabilidad de agregados relacionada con C y N.....	34
4.3.1 Carbono orgánico y Nitrógeno total .....	34
4.4 Estabilidad de agregados .....	36
4.5 Materia orgánica particulada intra-agregados (i-MOP) .....	39
4.6 Sustancias húmicas.....	41
Capitulo V.....	44
5.1 Discusión.....	44
5.1.1.1 Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic)- Pastizal.....	45
5.1.1.2 Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic, Hyperhumic)-Acahual .....	46
5.1.1.3 Follic Cambic Mollic Umbrisol (Clayic, Hyperhumic)- Bosque.....	47
5.2 Conclusiones .....	51
ANEXO I.....	53
A1.1 Descripción morfológica del perfil del pastizal .....	53
A1.2 Descripción morfológicas del perfil del acahual.....	54
A1.3 Descripción morfológica del perfil del bosque .....	55
ANEXO II.....	56
A2.0 Descripción micromorfológica del horizonte Ap1 del Phaeozem del pastizal.....	56
A2.1 Descripción micromorfológica del horizonte Ap2 del Phaeozem del pastizal .....	60
A2.2 Descripción micromorfológica del horizonte 2Bwg1 del Phaeozem del pastizal.....	64
A2.3 Descripción micromorfológica del horizonte 2Bwg2 del Phaeozem del pastizal.....	67
A2.4 Descripción micromorfológica del horizonte 3Cg del Phaeozem del pastizal.....	70
A2.5 Descripción micromorfológica del horizonte Ah1 del Phaeozem del acahual .....	73
A2.6 Descripción micromorfológica del horizonte Ah2 del Phaeozem del acahual .....	77
A2.7 Descripción micromorfológica del horizonte AB del Phaeozem delacahual.....	81
A2.8 Descripción micromorfológica del horizonte 3Bw del Phaeozem del acahual.....	85

A2.9 Descripción micromorfológica del horizonte Ah del Umbrisol del bosque.....	88
A2.10 Descripción micromorfológica del horizonte 2Ah del Umbrisol del bosque.....	92
A2.11 Descripción micromorfológica del horizonte 2AB del Umbrisol del bosque.....	96
A2.12 Descripción micromorfológica del horizonte 2BC del Umbrisol del bosque.....	100
6. Bibliografía.....	103

## Índice de Figuras

Figura 1. Componentes orgánicos e inorgánicos que intervienen en la formación de los agregados y la estructura.....	5
Figura 2. Localización geográfica del sitio de estudio y los puntos de muestreo.....	12
Figura 3. Climograma de la estación Tamapatz (SMN, 2021).....	14
Figura 4. Perfiles de suelos descritos en Ojo de agua San Francisco.....	22
Figura 5. Bloques subangulares y angulares del horizonte 2Bwg1 y 2Bwg2 con presencia de concreciones de manganeso.....	23
Figura 6. Bloques subangulares finos y medios de los horizontes Ah1 y Ah2.....	25
Figura 7. Agregados granulares medios, finos y muy finos de los horizontes Ah y 2Ah.....	26
Figura 8. Sección delgada del horizonte Ap1 del Phaeozem en el pastizal.....	28
Figura 9. Sección delgada del horizonte Ap2 del Phaeozem en el pastizal.....	29
Figura 10. Sección delgada del horizonte Ah1 del Phaeozem en el acahual.....	31
Figura 11. Sección delgada del horizonte Ah2 del Phaeozem en el acahual.....	32
Figura 12. Sección delgada del horizonte Ah del Umbrisol en el bosque.....	33
Figura 13. Sección delgada del horizonte 2Ah del Umbrisol en el bosque.....	34
Figura 14. Variabilidad del contenido de CO de los epipedones ( $p=0.031^*$ ).....	36
Figura 15. Proporción de macroagregados ( $>2000\mu\text{m}$ ) de los horizontes órgano-minerales ( $p>0.05$ ).....	37
Figura 16. Proporción de mesoagregados ( $2000-250\mu\text{m}$ ) de los horizontes órgano-minerales ( $p>0.05$ ).....	38
Figura 17. Proporción de microagregados ( $250-53\mu\text{m}$ ) de los horizontes órgano-minerales ( $p>0.05$ ).....	39
Figura 18. Gráfica de barras con las proporciones de i-MOP de macroagregados, mesoagregados y microagregados.....	40
Figura 19. Distribución de las sustancias húmicas en los epipedones de los suelos estudiados...	42
Figura 20. Proporción de CO en los horizontes superficiales (Ap1, Ah1 y Ah) y subsuperficiales (Ap2, Ah2 y 2Ah) en i-MOP de los macro, meso y microagregados, y en cada fracción de las sustancias húmicas.....	43

### ANEXO II

Figura 1. Sección delgada del horizonte Ap1 del Phaeozem en el pastizal.....	56
--	----

Figura 2. Agregados granulares fuertemente desarrollados y pequeños residuos carbonizados (flecha azul). Izquierda en luz plana (LPP) y derecha en luz polarizada plana (LPC).....	57
Figura 3. Residuo de raíz, ligeramente descompuesta pues se aprecian todos sus tejidos y alta birrefringencia en LPC (flecha azul). Izquierda en LPP y derecha en LPC.....	58
Figura 4. Excrementos en un poro en LPP.....	59
Figura 5. Sección delgada del horizonte Ap2 del Phaeozem en el pastizal.....	60
Figura 6. Agregados subangulares de moderado desarrollo con material fino amorfo globular dentro de los agregados (flecha azul). Izquierda en LPP y derecha en LPC.....	61
Figura 7. Material orgánico grueso con alta birrefringencia en el centro (flecha azul) y una fábrica b-moteada. Izquierda LPP y derecha LPC.....	61
Figura 8. Grano mineral anhedral (flechas azules). Izquierda LPP y derecha LPC.....	62
Figura 9. Residuo de material carbonizado. Izquierda LPP y derecha LPC.....	63
Figura 10. Sección delgada del horizonte 2Bwg1 del Phaeozem en el pastizal.....	64
Figura 11. Residuo de raíz, con una fábrica b-moteada. Izquierda LPP y derecha LPC.....	65
Figura 12. Residuo de raíz (flecha azul) y revestimiento de arcillas. ....	66
Figura 13. Excrementos de ácaro relacionados con residuos de raíces en LPP.....	66
Figura 14. Sección delgada del horizonte 2Bwg2 del Phaeozem en el pastizal.....	67
Figura 15. Bloques angulares y subangulares, con revestimientos de arcillas; la fábrica es b-estriada con un componente muy opaco en LPP. Izquierda LPP y derecha LPC.....	68
Figura 16. Agregados en bloques subangulares moderadamente desarrollados; fabrica b-moteada. Izquierda LPP y derecha LPC.....	68
Figura 17. Fisura recubierta de arcilla, bien orientada. Izquierda LPP y derecha LPC.....	69
Figura 18. Sección delgada del horizonte 3Cg del Phaeozem en el pastizal.....	70
Figura 19. Revestimientos de arcillas en poros y granos en el horizonte 3Cg .....	71
Figura 20. Minerales y recubrimientos de arcilla, en una fábrica b-moteada. ....	71
Figura 21. Revestimientos de arcilla en poros fisura. Izquierda LPP y derecha LPC.....	72
Figura 22. Sección delgada del horizonte Ah1 del Phaeozem en el acahual.....	73
Figura 23. Agregados granulares y migajosos, moderadamente desarrollados, con poros cavidad (flecha azul) y poros de empaquetamiento compuesto en LPP.....	74
Figura 24. Agregados granulares y contorno de raíz. Izquierda LPP y derecha LPC.....	75
Figura 25. Relleno de excrementos en grupo en el centro de la raíz (flecha azul). ....	76
Figura 26. Sección delgada del horizonte Ah2 del Phaeozem en el acahual.....	77
Figura 27. Agregados granulares y migajosos, moderadamente desarrollados, con poros de empaquetamiento compuesto (flecha azul). Izquierda LPP y derecha LPC.....	78
Figura 28. Tejido parenquimático de residuo de raíz, moderadamente preservada. ....	79
Figura 29. Acumulación de arcilla entre agregados (flecha azul). ....	79
Figura 30. Material orgánico carbonizado (flecha azul). Izquierda LPP y derecha LPC.....	80
Figura 31. Sección delgada del horizonte 2ABw del Phaeozem en el acahual.....	81
Figura 32. Agregados en bloques subangulares moderadamente desarrollados. ....	82
Figura 33. Revestimientos y rellenos densos completos en fisuras .....	83
Figura 34. Material parental de lutitas ricas en arcillas; revestimientos de arcillas en fisuras. ...	84



Figura 35. Sección delgada del horizonte 3Bw del Phaeozem en el acahual.....	85
Figura 36. Agregados en bloques angulares y subangulares con poros de empaquetamiento compuesto. Izquierda LPP y derecha LPC.....	86
Figura 37. Bloques subangulares, con revestimientos y rellenos de arcilla. ....	86
Figura 38. Revestimientos de arcillas. Izquierda LPP y derecha LPC.....	87
Figura 39. Sección delgada del horizonte Ah del Umbrisol en el bosque.....	88
Figura 40. Agregados granulares fuertemente desarrollados dentro de bloques subangulares en LPP.....	89
Figura 41. Amorfos de material fino orgánico entre agregados granulares; fábrica-b moteada...90	90
Figura 42. Tejido de raíz, moderadamente descompuesto con agregados esferoidales.....	90
Figura 43. Rellenos de excrementos vistos en LPP (flecha azul) .....	91
Figura 44. Sección delgada del horizonte 2Ah del Umbrisol en el bosque.....	92
Figura 45. Agregados granulares fuertemente desarrollados; fábrica-b moteada. ....	93
Figura 46. Tejido orgánico preservado. Izquierda LPP y derecha LPC.....	93
Figura 47. Agregados granulares y arenas de granos minerales. Izquierda LPP y derecha LPC...94	94
Figura 48. Agregados granulares, excretas y raíz. Izquierda LPP y derecha LPC .....	95
Figura 49. Sección delgada del horizonte 2AB del Umbrisol en el bosque.....	96
Figura 50. Agregados granulares de moderado a fuertemente desarrollados; material orgánico carbonizado (flecha azul) en LPP.....	97
Figura 51. Agregados granulares y raíz con alto grado de desmenuzamiento (flecha azul). ....	98
Figura 52. Tejidos orgánicos con birrefringencia (flecha azul). Izquierda LPP y derecha LPC...98	98
Figura 53. Sección delgada del horizonte 2BC del Umbrisol del bosque.....	100
Figura 54. Bloques subangulares moderadamente desarrollados en LPP.....	101
Figura 55.- Agregados en bloques subangulares con raíces (flecha azul). ....	101
Figura 56.- Nódulo de Fe (flecha azul). Izquierda LPP y derecha LPC.....	102

## Indice de tablas

Tabla 1. Propiedades morfológicas, físicas y químicas en campo de los perfiles tipo de la microcuenca “Ojo de Agua San Francisco”.....	24
Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de los perfiles tipo de la microcuenca “Ojo de Agua San Francisco”.....	27
Tabla 3. Descripción micromorfológica en láminas delgadas de cada horizonte.....	30
Tabla 4. Contenidos de carbono orgánico (CO), nitrógeno total (N) y su relación C: N de los epipedones.....	35
Tabla 5. Distribución de CO en las sustancias húmicas.....	41

### ANEXO I

Cuadro 1. Descripción morfológica del perfil del pastizal.....	53
Cuadro 2. Descripción morfológicas del perfil del acahual.....	54
Cuadro 3. Descripción morfológica del perfil del bosque.....	55

## Resumen

La estabilidad de los agregados está estrechamente relacionada con la estabilización de la materia orgánica del suelo (MOS), principalmente el carbono orgánico (CO), debido a su capacidad complejante que brinda protección física a la materia orgánica particulada (MOP) en contra de su descomposición. El objetivo de esta investigación fue determinar la relación del carbono orgánico con la distribución y estabilidad estructural de los macro, meso y micro agregados del horizonte de acumulación de carbono orgánico en un bosque mesófilo de montaña (BMM). La investigación se realizó en la microcuenca Ojo de agua San Francisco, en Jalpan, Querétaro, sobre la ladera media donde se seleccionaron tres puntos de muestreo: pastizal, acahual y bosque. En cada sitio se estableció una parcela de muestreo de 12 m de diámetro, en donde se describió el perfil tipo en el centro y se tomaron muestras en bruto e inalteradas de cada horizonte para su análisis físico, químico y micromorfológico. También se recolectaron agregados del horizonte superficial y subsuperficial del perfil tipo y de nueve réplicas más localizadas en la parcela de muestreo. En laboratorio se determinó densidad aparente, textura, pH relación 1:2.5, concentración de carbono orgánico (CO) y de nitrógeno total, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), saturación de bases, estabilidad de agregados, la cuantificación de la materia orgánica particulada intra-agregados (i-MOP) y del CO en las sustancias húmicas. Además, se hizo la descripción micromorfológica de los agregados del suelo y los datos obtenidos de las proporciones de la estabilidad de agregados fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) de una vía. Los suelos se clasificaron como: Cambic Phaeozem (Endoloamic, Epiclayic) en el pastizal, Cambic Phaeozem (Endoloamic, Epiclayic, Hyperhumic) en el acahual y Follic Cambic Umbrisol (Clayic, Hyperhumic) en el bosque. Los tres suelos tienen horizontes de acumulación de COS con un intervalo de concentración entre 37.24–134.63 g·kg<sup>-1</sup> y se expresan en un horizonte móllico. La proporción de la estabilidad de agregados se distribuyó en macroagregados>mesoagregados>microagregados, donde no se encontraron diferencias significativas por sitio. Los principales procesos edafogénicos asociados con la estabilidad son la humificación y la estabilización del CO, en donde la proporción de i-MOP se encuentra en microagregados>mesoagregados>macroagregados. La concentración de CO en sustancias húmicas se distribuyó en C<sub>AF</sub>>C<sub>Huminas</sub>>C<sub>AH</sub>. La alta estabilidad de los agregados de los tres epipedones móllicos se relaciona con la protección física de iMOP y el almacén de COS en ácidos fúlvicos que, en conjunto con el alto contenido de arcillas, favorecen a su estabilización debido a que no hay diferencias entre los sitios.

## Capítulo I

### 1.1 Introducción

La agregación del suelo es una propiedad física que es el resultado de procesos físicos y químicos y de la organización entre las partículas minerales como arenas, limos y arcillas, componentes orgánicos como la materia orgánica particulada (MOP) y agentes de unión como moléculas orgánicas y cationes polivalentes (Six *et al.*, 2000; Tisdall y Oades, 1982). El conjunto de los agregados (peds) individuales define la estructura del suelo, que en general se expresa como la disposición heterogénea del espacio poroso y sólido del suelo (Ghezzehei, 2002). La agregación y la estructura del suelo controlan importantes procesos físicos, químicos y biológicos que inciden en las funciones de almacén de carbono, regulación del ciclo hidrológico y los ciclos biogeoquímicos (Bronick y Lal, 2005). Unas de las funciones del suelo de mayor relevancia en donde incide la agregación, es la regulación de los ciclos biogeoquímicos y el almacén de carbono debido a que la agregación propicia las condiciones adecuadas para la preservación y dinámica de la materia orgánica del suelo (MOS) y la estabilización del carbono orgánico del suelo (COS) dependiendo de su participación en la agregación (Lützwow *et al.*, 2006). La MOS juega un papel importante en la agregación debido a la propiedad polielectrolítica de las macromoléculas que la componen que le permite interactuar física y químicamente con los minerales (Aguilera, 2000). Por lo que existe una retroalimentación entre en la agregación y la MOS ya que ésta última favorece a la estabilidad de agregados y a su vez los agregados favorecen su preservación (LiuSiu *et al.*, 2019).

La dinámica entre los agregados, la preservación de MOS y la estabilización del COS depende de los procesos edafogénicos y del uso de suelo (Li *et al.*, 2020) en donde las prácticas de manejo pueden modificar los reservorios de COS y el tipo de agregación dominante. Múltiples estudios han mostrado que la influencia del tipo de vegetación y los disturbios antrópicos a diferentes escalas, afectan las funciones del suelo (Ferreira *et al.*, 2020; Six *et al.*, 2000; Watteau *et al.*, 2019). En suelos donde se realiza labranza, los agregados formados por la actividad biológica (biogénicos) son los más sensibles ya que su macrofauna puede disminuir repercutiendo en la preservación de MOS y en la estabilidad de los agregados (Ferreira *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2020). Sin embargo, cuando el uso de suelo es predominantemente de pastizal

las raíces y otros componentes orgánicos, proporcionan más MOP intraagregados que actúan como centro nucleador de formación de microagregados producto de la descomposición y donación de exudados (Oades 1984, Six *et al.*, 2000) favoreciendo a su estabilidad y la estabilización de COS (Pulleman *et al.*, 2005).

Debido a la complejidad que representa estudiar la estabilidad de los agregados y todos los factores y procesos edafogénicos que intervienen en su formación, es de vital importancia evaluar la agregación, la estabilidad de los agregados y la estabilización del COS en suelos de bosque mesófilo de montaña (BMM), para posteriormente ser utilizados como un indicador de calidad del sitio.

## **1.2 Marco Teórico**

### ***1.2.1 Agregación***

Los agregados son resultado de procesos complejos y jerárquicos de organización entre las partículas minerales como arenas, limos y arcillas, agentes de unión como las moléculas orgánicas y cationes polivalentes (Ferreira *et al.*, 2019; Six *et al.*, 2000; Tisdall y Oades, 1982). Los agregados se pueden dividir de acuerdo con su tamaño en macroagregados (>2000  $\mu\text{m}$ ), mesoagregados (2000-250  $\mu\text{m}$ ) y microagregados (250-53  $\mu\text{m}$ ).

La formación de los agregados se puede clasificar como biogénica, físicogénica e intermedia dependiendo de los procesos edafogénicos dominantes. Los agregados biogénicos se caracterizan por ser agregados esferoidales (granulares y migajosos) que derivan de la actividad biológica de las comunidades de macroinvertebrados y de las raíces (Velásquez *et al.*, 2007), y su presencia se relaciona con la estabilización de la MOS (Pulleman *et al.*, 2005). Además, el empaquetamiento de los agregados es compuesto debido a la presencia de poros intersticiales heterogéneos, continuos y semipermanentes (Bullock *et al.*, 1985).

Los agregados físicogénicos generan prismas y bloques angulares como resultado de los ciclos de humectación y secado que favorecen el agrietamiento entre cada agregado debido a la dinámica de las arcillas 2:1 (Stoops, 2003).

Finalmente los agregados intermedios, como los bloques subangulares, se forman a partir del redondeo de los ángulos de los bloques por la actividad de las raíces, formando bioporos de tipo canal, continuos, semipermanentes e incluso se pueden formar poros de empaquetamiento

compuesto (Bullock *et al.*, 1985).

La agregación es el resultado de la interacción de varios procesos, como la floculación de los coloides del suelo, la precipitación de sales y cationes, la complejación de la MOS con óxidos e hidróxidos de Fe y Al, los complejos arcilla-humus y enlaces iónicos entre los cationes del suelo con los coloides (Figura 1) (Six *et al.*, 2000; Tisdall y Oades, 1982). La estabilidad de los agregados está en función de las fuerzas cohesivas y la tensión superficial entre la interfase aire-agua para resistir a las fuerzas disruptivas aplicadas como la desintegración de los agregados debido al impacto y abrasión generadas por la fuerza del viento o del agua (Kemper y Rosenau, 1986). Además, los agregados forman un sistema de retroalimentación con la MOS debido a que ésta favorece a su estabilidad y al mismo tiempo, los agregados favorecen a su preservación (LiuSiu *et al.*, 2019; Six y Paustian, 2014).

La estabilidad de los agregados puede funcionar como un indicador de cambio entre las fracciones químicas y físicas de COS, incluso antes de notar cambios en su contenido total de COS. De manera que, si hay cambios en la estabilidad de los agregados, hay cambios en la efectividad de los agentes orgánicos de agregación (Haynes y Swift, 1990). Es importante considerar la heterogeneidad de la MOS ya que su naturaleza, dinámica y distribución espacial dentro del suelo da como resultado la formación de los agregados con distinta morfología e intervalos de contenido de MOS (Ferreira *et al.*, 2020; Haynes y Swift, 1990).

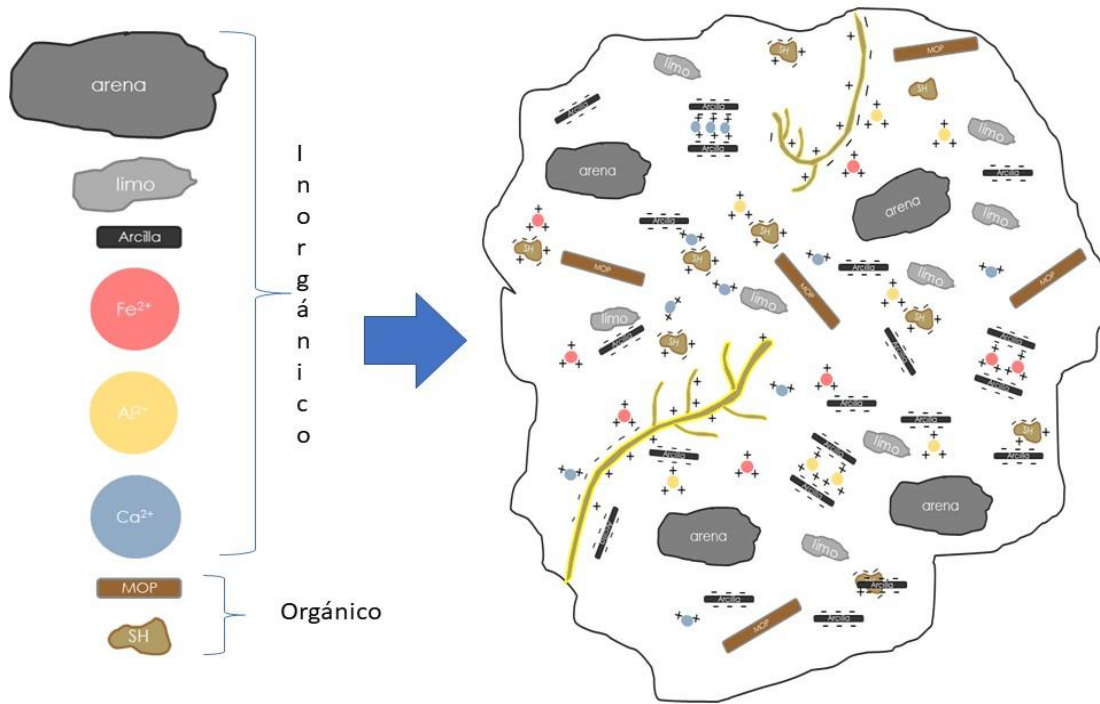


Figura 1. Componentes orgánicos e inorgánicos (minerales en tamaño arena, limo y arcilla y cationes polivalentes) que intervienen en la formación de los agregados y la estructura.

Otro factor importante en la estabilidad de agregados es el contenido y tipo de arcillas debido a sus propiedades físicas y químicas, como su superficie específica y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), que a su vez favorece a la formación de complejos órgano-minerales (Bronick y Lal, 2005). Las arcillas cristalinas no expansivas como las caolinitas tienen una baja CIC y área superficial, lo que tiende a disminuir la estabilidad de agregados. En cambio, las arcillas de alta actividad como las esmectitas, con CIC alta y un área superficial grande, aumentan la estabilidad de los agregados (Six *et al.*, 2000). Sin embargo, las arcillas 2:1 con contracción-expansión pueden modificar la estabilidad de agregados en época de sequía y humedad (Attou *et al.*, 1998). La interacción de las arcillas y el COS en los agregados está influenciada por el pH, la CIC y los cationes polivalentes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  (Tisdall, 1996). El  $\text{Ca}^{2+}$  es capaz de formar puentes catiónicos con las partículas de arcillas y COS e influye en la saturación del complejo de cambio, lo que inhibe la dispersión de las arcillas y la disrupción de los agregados (Armstrong y Tanton, 1992). Los cationes polivalentes  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  también favorecen a la estabilidad de agregados mediante puentes catiónicos y la formación de compuestos y geles organometálicos (Amezketta,

1999). En suelos ácidos, los óxidos de Fe y Al controlan la agregación al estar en interacción con arcillas de alta CIC y tienden a aumentar la incorporación de COS por procesos de complejación (Six *et al.*, 2000).

Debido a todas las interacciones complejas en la formación y estabilidad de los agregados, estos pueden presentar modificaciones significativas en su clase y estabilidad a través de cambios en el uso de suelo (LiuSui *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2020), lo que puede afectar el arreglo de la estructura. Se ha demostrado que en ambientes donde no se modifica el uso de suelo, como en los bosques naturales, la agregación y la estabilidad estructural reflejan la calidad de los suelos en los ecosistemas y mantienen su función de almacén de COS, disminuyendo las emisiones de C y la erosión del suelo, especialmente en las regiones montañosas con altas precipitaciones (Ayoubi *et al.*, 2012). Sin embargo, es importante tener información adicional sobre las tasas de descomposición de los residuos de la vegetación, la interacción con los tipos de suelo y las condiciones ambientales para promover la agregación (Verchot *et al.*, 2011).

### ***1.2.2 Materia orgánica y carbono orgánico del suelo***

La materia orgánica del suelo (MOS) es un componente del sistema edáfico y su evolución durante la edafogénesis determina procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. Una de las principales propiedades de la MOS es su capacidad complejante, derivada del carácter polielectrolítico de sus macromoléculas, la cual permite que se lleve a cabo la agregación. Sin embargo, la composición de la MOS es heterogénea dependiendo del ambiente y el ecosistema en donde se desarrolle el suelo, por lo que su estabilización va a estar relacionada con la estructura del suelo.

De acuerdo con Lützow *et al.* (2006) existen tres mecanismos de estabilización de MOS en el suelo:

- 1) **Preservación selectiva:** se debe a la recalcitrancia primaria debido a mezclas complejas en el humus del suelo derivadas de los componentes orgánicos como algunos polisacáridos, almidón, celulosa, hemicelulosa, lignina, entre otras. La recalcitrancia secundaria se da en productos microbianos, algunos materiales carbonizados y la formación de polímeros húmicos debido a la descomposición parcial de los residuos vegetales, seguidos por reacciones de condensación y polimerización (Kononova, 1961).
- 2) **Inaccesibilidad espacial:** depende de la localización de la MOS en el espacio, que influye en



el acceso de los microorganismos y exoenzimas. Estos mecanismos incluyen la oclusión de la MOS por agregación, la intercalación de  $Al^{3+}$  con MOS formando compuestos órgano-minerales, la MOS dentro de las uniones de celdas unitarias de los filosilicatos y la encapsulación en macromoléculas orgánicas.

- 3) Interacciones con superficies y iones metálicos: Son interacciones intramoleculares entre MO y componentes inorgánicos u orgánicos del suelo que alteran la velocidad de descomposición. Estos mecanismos se dan mediante intercambio de ligandos, puentes catiónicos polivalentes, interacciones débiles como fuerzas de Van der Waals, puentes de H y complejación arcilla-humus y quelatos.

Los principales componentes de la MOS son el carbono orgánico del suelo (COS) y el carbono orgánico de la biomasa microbiana, ambos propician la formación inicial de los agregados, además del carbono orgánico coloidal, como las macromoléculas de las sustancias húmicas (SH), que los mantienen enlazados durante largos periodos de tiempo (Krull *et al.*, 2004). Las sustancias húmicas son una mezcla amorfa extremadamente compleja de macromoléculas sumamente heterogéneas, producidas durante la descomposición de materiales biológicos (Ghabbour y Davies, 2001). Se dividen de acuerdo con su solubilidad en medios ácidos o alcalinos en ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) y huminas (Theng, 2012). Los AF se caracterizan por ser coloides de bajo peso molecular (200-3000 Da), de color amarillo, compuestos principalmente por cadenas alifáticas, con relaciones oxígeno/carbono altas (Strawn *et al.*, 2015). Los AH son macromoléculas con alto peso molecular (>3000 Da), de color pardo oscuro, con un alto contenido de estructuras aromáticas derivadas predominantemente de ligninas (DiDonato *et al.*, 1980). Estas sustancias húmicas son los coloides orgánicos del suelo con propiedades físicas y químicas diagnósticas como una mayor área superficial y una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) y están fuertemente asociadas con la fracción coloidal mineral o microagregados estables (Almendros y González-Vila, 1987).

Otra fracción importante de la MOS es la materia orgánica particulada que se encuentra dentro de los agregados (i-MOP), siendo los macroagregados los que contienen las fracciones más gruesas y frescas de la i-MOP. Sin embargo, puede seguir descomponiéndose y fragmentándose hasta formar parte de los microagregados, quedando inaccesible a la descomposición microbiana y formando parte de un reservorio importante de C (Six *et al.*, 1998; Six *et al.*, 2000).

Tisdall y Oades (1982) clasifican la MOS de acuerdo con su participación en la agregación

durante la edafogénesis en:

- Agentes persistentes: materiales húmicos asociados con silicatos metálicos amorfos, la materia orgánica asociada a cationes polivalentes y materia orgánica particulada (MOP) derivada de fragmentos resistentes de raíces e hifas fúngicas.
- Agentes temporales: materia orgánica derivada de raíces e hifas.
- Agentes transitorios: materiales orgánicos fácilmente mineralizables como algunos polisacáridos y carbohidratos.

La vinculación entre el carbono orgánico transitorio y el carbono orgánico persistente se rige por tasas únicas de mineralización y mecanismos de estabilización, ya sea por protección física ligada a la incorporación e inaccesibilidad microbiana de la materia orgánica particulada dentro de los agregados (iMOP) o por la protección química adquirida durante el proceso de humificación que conlleva a la formación de las sustancias húmicas (SH) (Lützow *et al.*, 2006; Six *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2017).

### ***1.2.3 Bosques Mesófilos de Montaña***

Uno de los ecosistemas de vital interés debido a su riqueza florística son los bosques mesófilos de montaña (BMM), donde convergen elementos florísticos del sur y este de Asia, así como elementos boreales en los estratos arbóreos y meridionales en el sotobosque (Rzedowski, 2006). En México, estos ecosistemas arribaron durante el Plioceno y el Pleistoceno (Rzedowski, 1993) y representan  $\pm 1\%$  del territorio nacional, se calcula que aproximadamente un 50% de su superficie original ha sido desplazada por otros tipos de vegetación (Challenger, 1998). Los BMM al ser ecosistemas que albergan la mayor diversidad de flora y fauna en relación con su área (Challenger y Soberón, 2008), los convierte en prioritarios para la conservación por su importancia en el mantenimiento de ciclos hidrológicos y de nutrientes (CONABIO, 2010). Asimismo, son ecosistemas heterogéneos en donde influye la elevación, la precipitación y un alto contenido de humedad que propicia cambios en su estructura vegetal, poseen una tendencia a que las hojas se vuelvan más xeromórficas, es decir, se vuelven más pequeñas, más gruesas y duras (Bruijnzeel y Veneklass, 1998). Además, se ha visto que en las hojas y mantillo de los BMM las concentraciones de nutrientes como el nitrógeno, el fósforo y el potasio disminuyen con la elevación, por lo que se piensa que la condición xeromórfica podría ser una adaptación a

los bajos nutrientes (Lovelees, 1991). Sin embargo, la vegetación del BMM asigna una gran proporción de su biomasa a la producción de raíces finas, lo que sugiere que hay una mayor inversión de energía en la captura de recursos subterráneos en elevaciones más altas o en condiciones de suelo más adversas (Leuschner *et al.*, 2007).

Las características de los suelos bajo un BMM son: fuerte acidez, periodos de saturación, bajo contenido de nutrientes y un mantillo grueso en superficie (Álvarez-Arteaga *et al.*, 2013; Bruijnzeel *et al.*, 1993). Por lo que la transformación y mineralización de la materia orgánica de los suelos en estos ecosistemas está controlada por las condiciones ambientales y edáficas. Algunos investigadores han observado que el contenido total de nitrógeno del suelo aumenta junto con el carbono total, pero las reservas del suelo y las fracciones disponibles de estos elementos no muestran una clara tendencia con la altitud en todos los BMM (Bruijnzeel y Proctor, 1995). Otros autores indican que este fenómeno se relaciona con la lenta mineralización de la MOS como el mecanismo principal que limita el suministro de los nutrientes a la vegetación (Grubb, 1977).

Para entender la dinámica de los nutrientes en estos ecosistemas es importante considerar la dinámica del agua en el suelo, que en los BMM persiste en condiciones casi saturadas que pueden reflejarse en propiedades estagnicas con moderado a alto hidromorfismo. Es probable que el efecto más importante del agua sobre la disponibilidad de nutrientes en estos bosques sea la reducción de la mineralización del mantillo debido a las condiciones anaeróbicas del suelo, quizás acentuada por mayores tasas de pérdida de nutrientes por lixiviación (McDowell y Asbury, 1994).

En Querétaro, los BMM representan el 0.5% del área del estado y albergan una alta diversidad de flora y fauna (Cartujano *et al.*, 2002). Sin embargo, su área se ha reducido rápidamente debido a la expansión de actividades extractivas que impiden la regeneración natural de la vegetación causando desbalance de nutrientes y cambios en la composición de MOS. Además, estas actividades repercuten en los procesos edafogenéticos y en la disminución de la funcionalidad del suelo como almacén de carbono orgánico, en el mantenimiento del ciclo hidrológico, biodiversidad y reciclado de nutrientes (Anaya *et al.*, 2016; Rosas-Rangel *et al.*, 2019) que en conjunto se vinculan con el impacto en las propiedades físicas del suelo como la estructura.

Con base en lo enunciado, uno de los temas de interés es conocer la dinámica de carbono en los

suelos de los BMM. Álvarez-Arteaga *et al.* (2013) reportaron que el almacén de C en los BMM de la Sierra Norte de Oaxaca varía de 330.23 a 439.76 t ha<sup>-1</sup> que constituyen el 38-39 % del almacén de C total. Además, se determinó que los principales procesos edafogénicos son la acumulación de humus, la meteorización ácida del suelo *in situ*, la concentración de humus derivado de las raíces finas y la reducción del Fe por saturación de agua en el horizonte superior, así como mantillos gruesos en la superficie (Álvarez-Arteaga *et al.*, 2008, Bautista-Cruz y del Castillo 2005). Sin embargo, la interacción que tiene la MOS en la estabilidad y formación de los agregados del suelo en estos ecosistemas no ha sido descrita.

### **1.3 Planteamiento del problema**

Debido a que la estructura es una propiedad física derivada de las interacciones complejas entre los componentes minerales y orgánicos del suelo es importante evaluar cómo el cambio en la calidad del COS modifica el arreglo estructural y la estabilidad de agregados en sitios del BMM.

#### ***1.3.1 Pregunta***

¿Cómo se relacionan los compartimentos de COS con la estabilidad estructural de los macro y micro agregados en el horizonte de acumulación de carbono orgánico de los suelos que se desarrollan en un bosque mesófilo de montaña?

### **1.4 Justificación**

La importancia de preservar y entender el sistema suelo, en especial el estudio de la protección del COS, asociado con los procesos del desarrollo de la estructura, la estabilidad de los agregados y su relación con las diferentes fracciones de COS ayudará a entender y planear el contrapeso ante los procesos de degradación, derivados de la pérdida de cobertura vegetal por manejo (LiuSui *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2020). En particular, el suelo de los BMM brinda la función de almacén de carbono (CONABIO, 2010; Rosas-Rangel *et al.*, 2019) y su cambio por manejo conlleva a modificaciones en los patrones de protección del COS. Debido a esto es necesario caracterizar las fracciones del COS en los macro, meso y micro agregados para que, a través de su grado de evolución se relacionen con la estabilidad estructural y su arreglo micromorfológico en un BMM en la Sierra Gorda.

## **1.5 Objetivos**

### ***1.5.1 Objetivo general***

Determinar la relación de los compartimentos del carbono orgánico con la distribución y estabilidad estructural de los macro, meso y micro agregados del horizonte de acumulación de carbono orgánico en un BMM.

### ***1.5.2 Objetivos particulares***

- Identificar los procesos edafogénicos asociados con la acumulación de los compuestos orgánicos en los horizontes superficiales y clasificar los suelos.
- Relacionar la edafogénesis con el arreglo estructural de los horizontes superficial y subsuperficial con las fracciones de COS.
- Relacionar los cambios en la estabilidad de los macro, meso y micro agregados de los horizontes con las fracciones de COS.

## **1.6 Hipótesis**

- La mayor estabilidad estructural de los agregados en los horizontes superficial y subsuperficial del suelo dependerá de un mayor contenido de COS.
- Una mayor proporción de sustancias húmicas y i-MOP en los horizontes superficial y subsuperficial del suelo favorecerán la estabilidad de los macroagregados;
- Mientras que en los microagregados su estabilidad dependerá de las proporciones de carbono orgánico de las sustancias húmicas.

## Capítulo II

### 2. Sitio de Estudio

El sitio de estudio se encuentra en la Reserva de la Biósfera “Sierra Gorda” en la microcuenca “Ojo de Agua, San Francisco” en el municipio de Jalpan, Querétaro en las coordenadas 21°33'6.47"N, 99°11'50.06"O (Figura 2).



Figura 2. Localización geográfica del sitio de estudio y los puntos de muestreo.

### 2.1 Geología

El sitio de estudio está sobre rocas calizas de secuencias carbonatadas de ambientes cercanos a la costa y lagunares de plataforma, pertenecientes a la formación El Abra y El Doctor que fueron depositadas durante el Cretácico inferior hace 114 Ma con un espesor de 1500 m. Las secuencias están constituidas principalmente por pelmicritas, bioesparitas y dolomías, mientras que los sedimentos de las márgenes de la plataforma o de “cuenca” son principalmente micritas fosilíferas (Carrasco, 1970). También en la zona se pueden encontrar algunos afloramientos de rocas ígneas intrusivas del Jurásico Medio (152 Ma) hasta el Cretácico Inferior. Son principalmente de granodiorita y diorita con composición intermedia de 52-63% de sílice y presentan un enriquecimiento de aluminio de 16% debido a su contenido de plagioclasas (SGM, 1997).

## 2.2 Fisiografía

Pertenece a la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Oriental dentro de la Subprovincia del Carso Huasteco. Su geomorfología montañosa se debe a eventos de deformación tectónica, durante la orogenia Laramide, que originó pliegues y cabalgaduras donde las elevaciones presentan acumulaciones volcánicas y las laderas están moldeadas por procesos disolutivos (SGM, 1997).

## 2.3 Vegetación y uso de suelo

La vegetación del sitio está compuesta por especímenes de Bosque Mesófilo de Montaña que se caracteriza por la abundancia y diversidad de epífitas, trepadoras leñosas y pteridofitas, que en su conjunto forman parte importante de la biomasa de la comunidad (Rzedowski, 1996). Su estructura y composición florística es variable y cambia de un sitio a otro en función de las variables climáticas ocasionadas por la diferencia de altitud, exposición y grado de disturbio. Las especies más importantes son: *Liquidambar styraciflua* (Somero), *Ulmus mexicana* (petatillo), *Quercus affinis* (encino escobillo), *Cupressus lindleyi* (cedro blanco) y *Taxus globosa* (granadillo). Entre 1200 y 1600 m de altitud el bosque es dominado por *Liquidambar styraciflua* con *Clethra pringlei*, *Dalbergia palo-escrito*, *Lonchocarpus rugosus*, *Ostrya virginiana*, *Tilia mexicana* y *Turpia occidentalis* (Zamudio et al., 1992).

El sitio se encuentra dentro de la reserva de la Biosfera de la Sierra Gorda decretada en el año de 1997. Los usos de suelo son forestal, agrícola, pecuario, habitacional y conservación. Sin embargo, existen zonas donde se realizan talas y desmontes para la introducción de ganado o para desarrollar alguna actividad agrícola lo cual altera la vocación y uso de suelo (SEMARNAP, 1999).

## 2.4 Clima

Las unidades climáticas reportadas para la región son semicálido húmedo y semicálido subhúmedo con una precipitación media anual de 1500 a 3000 mm y una temperatura media anual

de 12 a 26° C (INEGI, 2005). Sin embargo, de acuerdo con los datos de las normales climatológicas de la estación meteorológica más cercana, el clima es (A)C(m)w"(e) semicálido húmedo con una precipitación anual de 2571.1 mm siendo septiembre el mes más lluvioso y enero el más seco. Tiene una temperatura media anual de 20.6° C siendo junio el mes más caliente y enero el más frío, y el régimen de lluvias es intermedio con un periodo de secas en agosto.

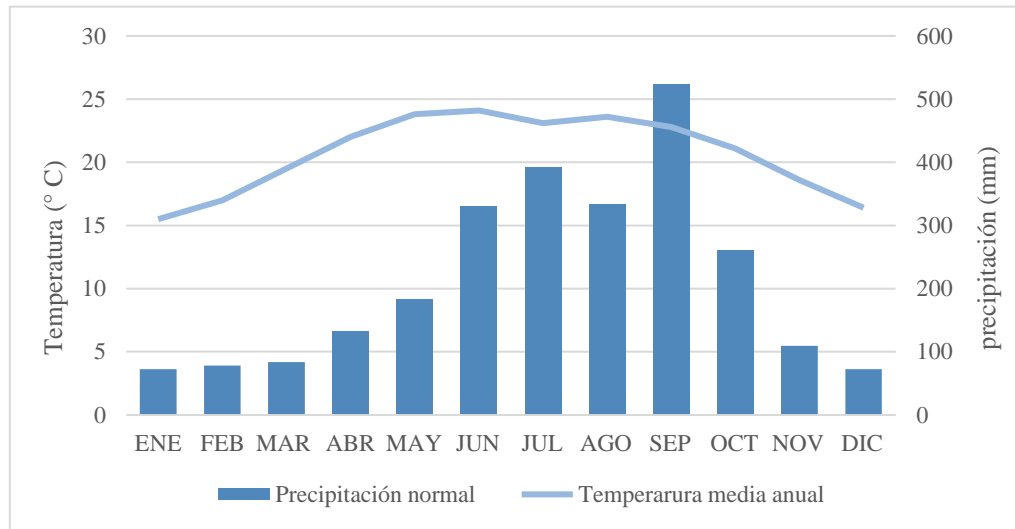


Figura 3. Climograma de la estación Tamapatz (SMN, 2021).

## 2.5 Edafología

Los suelos que se reportan para ecosistemas cercanos al sitio son: Leptosol, Luvisol (INEGI, 2005), Umbric Alisol (Cutanic, Humic) y Albic Fragic Luvisol (Calcaric, Cutanic) (Krasilnikov *et al.*, 2016).

Los Leptosols se caracterizan por ser suelos delgados que tienen roca continua muy cerca de la superficie o contienen mucha pedregosidad. Principalmente, se encuentran en laderas altas o medias con una topografía fuertemente disectada. Si se desarrollan sobre material calcáreo pueden tener un horizonte mólico (WRB, 2015). La pedogénesis del Alisol se debe a la alta precipitación de aproximadamente 3000 mm, su material rico en silicatos y una comunidad vegetal diversa de BMM que se expresa en un horizonte de acumulación de materia orgánica polimerizada. En cambio, el Luvisol se desarrolló en un sitio con precipitación de 1000 mm, una mezcla de material parental rico en silicatos y derivados de caliza y una menor diversidad en la vegetación de BMM, donde se puede detectar iluviación de arcilla (Krasilnikov *et al.*, 2016).



## Capítulo III

### 3.1 Métodos

#### *3.1.1 Diseño experimental y trabajo de campo*

En el sitio de estudio se establecieron tres parcelas en la parte media de la ladera con orientación NE y se realizó un muestreo de conglomerado en forma circular de 12 m de diámetro (CONAFOR, 2011). En la parte central de cada parcela se estableció el perfil tipo y se describió la morfología de cada uno de los horizontes, color con tabla Munsell (2000), textura al tacto, densidad de raíces, forma, tamaño y abundancia de poros y descripción de la forma, clase y desarrollo de los agregados utilizando el manual de Siebe *et al.* (2006). En cada horizonte se colectaron muestras alteradas (~1 kg) para su análisis físico y químico en laboratorio y muestras inalteradas para su análisis micromorfológico de los suelos. Posteriormente, se establecieron 10 puntos en la circunferencia en sentido de las manecillas del reloj y se recolectaron agregados del horizonte superficial y subsuperficial.

### 3.2 Trabajo de laboratorio

#### *3.2.1 Caracterización de propiedades físicas y químicas del suelo*

Las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente durante 48 horas; posteriormente se cuartearon, se molieron en un mortero de madera y se tamizaron por malla #10 y por malla #60.

La determinación de los parámetros físicos y químicos del suelo fueron: densidad aparente (método del cilindro), pH en agua destilada y KCl relación 1:2.5, carbono orgánico (método de oxidación en húmedo), nitrógeno (método Kjeldahl), bases intercambiables, capacidad de intercambio catiónico (CIC) (método de acetato de amonio). Todos los procedimientos se realizaron de acuerdo con el Manual del ISRIC Technical Paper 9 (van Reeuwijk, 2002). La determinación de la textura se realizó por el método de la pipeta (Soil Survey Staff, 2014).

#### *3.2.2 Densidad aparente por el método de cilindro*

Se tomaron muestras inalteradas del suelo de cada uno de los horizontes con cilindros de 100.3 cm<sup>3</sup>. Posteriormente, las muestras se secaron en la estufa a 105° C hasta llegar a pesoconstante.

La densidad aparente se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$DA = \frac{M_s}{V_c} \quad (1)$$

Dónde DA es la densidad aparente;  $M_s$  es el peso de la muestra de suelo seco a peso constante y  $V_c$  es el volumen del cilindro ( $100.3 \text{ cm}^3$ ).

### **3.2.3 pH en agua destilada y KCl**

Se pesó 10 g de suelo por duplicado de cada horizonte y se le agregó 25 ml de agua y al duplicado se le agregó 25 ml de KCl 1M. Posteriormente, se agitaron durante 2 horas y se midió el pH con un potenciómetro HANNA Instruments HI 2211.

### **3.2.4 Nitrógeno por Kjeldahl**

Se pesó 1 g de muestra del suelo y de los agregados cernidos por malla #60. Las muestras se colocaron en los tubos de digestión y se le añadió 25 ml de ácido sulfúrico concentrado, una pastilla de digestión y 3 ml de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y se digirieron por 3 horas. Luego, las muestras se destilaron en un equipo BÜCHI Kjelfex K-360 con 20 ml de NaOH al 38% y se les añadió 20 ml de ácido bórico con 5 gotas de indicador rojo de metilo con verde de bromocresol en un matraz Erlenmeyer. El destilado fue valorado con ácido clorhídrico 0.05 M.

El contenido de N se calculó con la siguiente fórmula:

$$N = \frac{a - b}{s} \times M \times 1.4 \times mcf \quad (2)$$

Donde  $a$  son los mililitros requeridos de HCl en la titulación de la muestra;  $b$  son los mililitros requeridos en la titulación del blanco;  $M$  es la molaridad de HCl; 1.4 es el porcentaje que representa el peso atómico del nitrógeno y  $mcf$  es el factor de corrección de humedad.

### **3.2.5 Saturación de bases y capacidad de intercambio catiónico (CIC)**

Se pesaron 5 g de muestra de cada horizonte, se le agregaron 25 ml de  $\text{NH}_4\text{Ac}$  1 M (pH 7), se agitaron durante 4 horas y se centrifugaron a 5000 rpm. El percolado obtenido se aforó a 50 ml y se determinó  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en un espectrofotómetro de absorción atómica PerkinElmer

Analist 3000, con una mezcla de aire-acetileno.

La CIC se determinó en la muestra de suelo sobrante de las bases intercambiables, se lavó con 40 ml de etanol al 80%. La muestra se pasó a un tubo de destilación con 100 ml de agua destilada y se agregó una pizca de NaCl y 10 ml de NaOH 1 M. La determinación se realizó por arrastre de vapor en un equipo BÜCHI KjelFex K-360. El destilado fue recibido en ácido bórico 1% con una solución indicadora de rojo de metilo con verde de bromocresol y se valoró con HCl 0.05 M. La CIC se calculó con la siguiente fórmula:

$$CIC (cmol (+) \cdot kg^{-1}) = \frac{(a - b) \times M \times 50 \times mcf}{s} \quad (3)$$

Donde  $a$  es el volumen requerido de HCl para la muestra;  $b$  es el volumen requerido para el blanco;  $M$  es la molaridad de HCl;  $s$  es el peso de la muestra y  $mcf$  es el factor de corrección de humedad.

### 3.2.6 Textura

Se pesaron 25 g de muestra de suelo de cada uno de los horizontes y se oxidó la materia orgánica con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30%, eliminando el exceso de MO. Las partículas se dispersaron en 20 ml de solución CALGON, 300 ml de agua destilada y se agitaron por 16 horas. Las arenas se separaron con malla #270 (53 µm), se lavaron con agua destilada, se secaron a 105° C y se pesaron. Las fracciones menores de 53 µm se suspendieron en una probeta de un litro y la solución se agitó durante 30 s. Para determinar el contenido de limos y arcillas se tomaron alícuotas de 20 ml con pipetas volumétricas. Para cada una de las fracciones se consideró la temperatura de la probeta y la profundidad a 10 cm de la cual se tomó la alícuota. Las alícuotas de 20 ml se pusieron a secar en una parrilla para quitar el exceso de agua y posteriormente se secaron en una estufa por 24 h a 105°C a peso constante. Cada una de las fracciones se calculó con las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ Arcillas} = 100 \times [(peso \text{ arcillas} - DW) \times (\frac{CF}{TW})] \quad (4)$$

$$\% \text{ Limos} = 100 \times [(peso \text{ limos} - DW) \times (\frac{CF}{TW})] - \% \text{ arcillas} \quad (5)$$

$$\% \text{ Arenas} = \frac{\text{peso arenas a } 105^{\circ} \text{ C}}{\text{peso total de la muestra}} \times 100 \quad (6)$$

Donde  $DW = 0.4408/CF$  es el peso del dispersante;  $CF = 1000 \text{ mL}/DV$ ;  $DV$  es el volumen de la alícuota (20 ml) y  $TW$  es el peso total de la muestra después del tratamiento de oxidación de la materia orgánica.

### 3.2.7 Estabilidad de agregados

Se realizó de acuerdo con el método de Kemper y Rosenau (1986) modificado por Six *et al.* (2000). Se tomaron 10 g de agregados <8 mm y se humectaron 1.5 veces a capacidad de campo. En tamices de 2.0, 0.25 mm y 53  $\mu\text{m}$  se sumergieron los agregados en agua destilada en periodos de 37 veces por minuto durante 2 minutos, por cada tamiz. Los agregados que permanecieron en los tamices se secaron a 50° C en la estufa hasta peso constante y posteriormente se pesaron.

La relación de los macroagregados, mesoagregados y microagregados se obtuvo con las siguientes fórmulas:

$$P_{mac} = \frac{\text{peso seco macroagregados}}{\text{peso inicial agregados } < 8 \text{ mm}} \quad (7)$$

$$P_{mes} = \frac{\text{peso seco mesoagregados}}{\text{peso inicial agregados } < 8 \text{ mm}} \quad (8)$$

$$P_{mic} = \frac{\text{peso seco microagregados}}{\text{Peso inicial agregados} < 8 \text{ mm}} \quad (9)$$

Donde  $P_{mac}$  es la proporción de macroagregados;  $P_{mes}$  es la proporción de mesoagregados y  $P_{mic}$  es la proporción de microagregados.

### 3.2.8 Separación de la Materia Orgánica Particulada intra-agregados

La separación de la Materia Orgánica Particulada intra-agregados (i-MOP) se realizó de acuerdo con el método de fraccionamiento físico por densidad (Christensen, 1992). Se tomaron 25 g de agregados < 8 mm y se dispersaron en 50 ml de NaI con una densidad de 1.7 g cm<sup>-3</sup>. La muestra se agitó durante 60 minutos y se centrifugó a 3000 rpm durante 30 segundos. El sobrenadante se decantó y se filtró al vacío utilizando membranas de 0.45 μm. La i-MOP que quedó sobre el papel filtro se enjuagó con agua destilada y se secó a 50° C hasta peso constante (Six *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2007). Se registró el peso de la i-MOP y se calculó la proporción correspondiente de acuerdo con el peso de la muestra.

### 3.2.9 Cuantificación de carbono orgánico del suelo (COS)

Se pesaron 0.08 g (±0.01) y se determinó el contenido de CO por oxidación con 10 ml de dicromato de potasio 0.1667 M y 20 ml ácido sulfúrico concentrado, agitando cuidadosamente por 60 segundos y reposando durante 30 minutos. Posteriormente, se le agregó 125 ml de agua destilada y 5 ml de ácido fosfórico concentrado. La valoración se hizo con sulfato ferroso 1 M usando ~1 ml de indicador de bario sulfonato de difenilamina al 0.16% hasta un vire verde esmeralda. Se calculó su porcentaje de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\%C = M \times \frac{V_1 - V_2}{S} \times 0.39 \times mcf \quad (10)$$

Donde  $M$  es la molaridad del sulfato ferroso;  $V_1$  el volumen de sulfato ferroso requerido para el blanco;  $V_2$  el volumen de sulfato ferroso requerido para la muestra;  $S$  el peso de la muestra y  $mcf$  es el factor de corrección de humedad. Para obtener el  $mcf$  se pesaron 2 g de muestra de suelo húmedo, se colocaron en cápsulas de porcelana en la estufa a 105° C hasta obtener un peso constante y se hizo la relación entre el peso en seco y el peso en húmedo (van Reeuwijk, 2002).

### 3.3 Fraccionamiento del CO

#### 3.3.1 Extracción de Ácidos Húmicos (AH) y Ácidos Fúlvicos (AF) del suelo

Se seleccionaron muestras con un alto contenido de CO y que tuvieran una tendencia normal en los agregados para realizar el fraccionamiento del CO en las sustancias húmicas con el método de la Sociedad Internacional de las Sustancias Húmicas (Swift, 1996).

De acuerdo con el resultado de CO de las muestras del suelo se calculó el peso de muestra necesaria para asegurar 1g de carbono. A cada fracción se le agregó ~1 ml de HCl 1 M hasta pH 1-2 y se llevó a una relación 1:10 con HCl 0.1 M. La muestra se agitó por una hora, se centrifugó a 5000 rpm y se filtró para separar la MOP; en la solución sobrenadante se valoró el carbono de los AF en HCl ( $C_{AF}$ ). El residuo se neutralizó con ~1 ml NaOH 1 M, se llevó a una relación 1:10 con NaOH 0.1 M y se agitó durante 4 horas. Posteriormente, se dejó reposar toda la noche y se centrifugó a 5000 rpm. En el sedimento queda el suelo con parte del CO no extraíble correspondiente a la fracción de las huminas ( $C_{Hum}$ ). El sobrenadante de las sustancias húmicas solubles en el medio alcalino se decantó y se acidificó con HCl 6 M hasta pH 1; se dejó reposar durante 16 horas y se centrifugó a 6,000 rpm para separar el precipitado con los AH y el sobrenadante con los AF. Los AH se suspendieron con KOH 0.1 M y KCl 0.3 M y se centrifugaron a 12,000 rpm para separar arcillas que sedimentan.

Las huminas saturadas con NaOH se lavaron con agua destilada hasta obtener pH 7 y se secaron para valorar el  $C_{Hum}$  por oxidación húmeda (Swift, 1996; van Reeuwijk, 2002).

La cuantificación del  $C_{AF}$  y  $C_{AH}$  se realizó mediante la desecación de las fracciones y se determinó por oxidación húmeda (van Reeuwijk, 2002).

Con los resultados de concentración de CO en AF, AH y Huminas se determinaron los índices  $C_{AH}:C_{AF}$  y  $C_{AH} + C_{AF}:C_{Hum}$ :

$$C_{AH}:C_{AF} = \frac{C_{AH}}{C_{AF}} \quad (11)$$

$$C_{AH} + C_{AF}:C_{Hum} = \frac{C_{AH} + C_{AF}}{C_{Hum}} \quad (12)$$

### **3.4 Análisis micromorfológico**

La preparación de las muestras inalteradas tomadas en campo se realizó de acuerdo con el método de Murphy (1986). Las muestras se trataron en el Laboratorio de Génesis del Colegio de Postgraduados, primero se secaron y luego impregnaron con resina poliéster insaturada y monómero estireno en una relación 7:3. Los bloques de suelos permanecieron en gelación (oscuridad) y después se secaron a la sombra, y con la luz del sol, para acelerar la polimerización de la resina. Una vez endurecidos los bloques, se pulieron con diferentes abrasivos de aluminio y silicio hasta conseguir un espesor de ~30  $\mu\text{m}$ . El espesor se determina cuando los minerales como el cuarzo y los feldspatos presentan colores de primer orden en el microscopio petrográfico. Después, las secciones delgadas se describieron en un microscopio petrográfico Leitz Laborlux 12 pols y se fotografiaron campos con una cámara Nikon D3500 montada en el microscopio. Se utilizó la luz polarizada plana (LPP) y la luz polarizada cruzada (LPC) para describir su color, birrefringencia, opacidad, entre otras características.

En las láminas delgadas se describió la estructura a partir de la distribución, orientación, tamaño, frecuencia, redondez y rugosidad de los agregados. También se describió el tipo de empaquetamiento y el tipo, tamaño y frecuencia de poros (Stoops *et al.*, 2003).

Se identificaron estructuras de los tejidos vegetales, como raíces tallos y hojas en luz plana y luz polarizada para ver el grado de preservación y fragmentación. También se identificó el material orgánico fino y el material orgánico fino amorfo (Bullock *et al.*, 1985).

### **3.5 Clasificación de suelos**

Los suelos se clasificaron utilizando la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo de la FAO (2015) y la Taxonomía de Suelos de la USDA (2014).

### **3.6 Análisis estadístico**

Se realizó una prueba de normalidad para cada uno de los tamaños obtenidos en la estabilidad de agregados y para el contenido de CO por horizonte, considerando que por cada horizonte hay 10 puntos. Después, se transformaron los datos obtenidos en cada fracción de agregados utilizando la función logaritmo. Se realizó una ANOVA de una vía en R estadístico para encontrar diferencias de la agregación y CO por cada uno de los sitios y horizontes (Webster y Oliver, 1990; Quinn y Keogh, 2002).

## Capítulo IV

### 4.1 Resultados

Se obtuvo la descripción y clasificación de los tres suelos evaluados en el sitio. También se describieron los agregados del suelo en meso y microescala, en donde se observaron características morfológicas específicas de cada uno de los horizontes.

#### 4.1.1 Procesos edafogénicos y clasificación del suelo

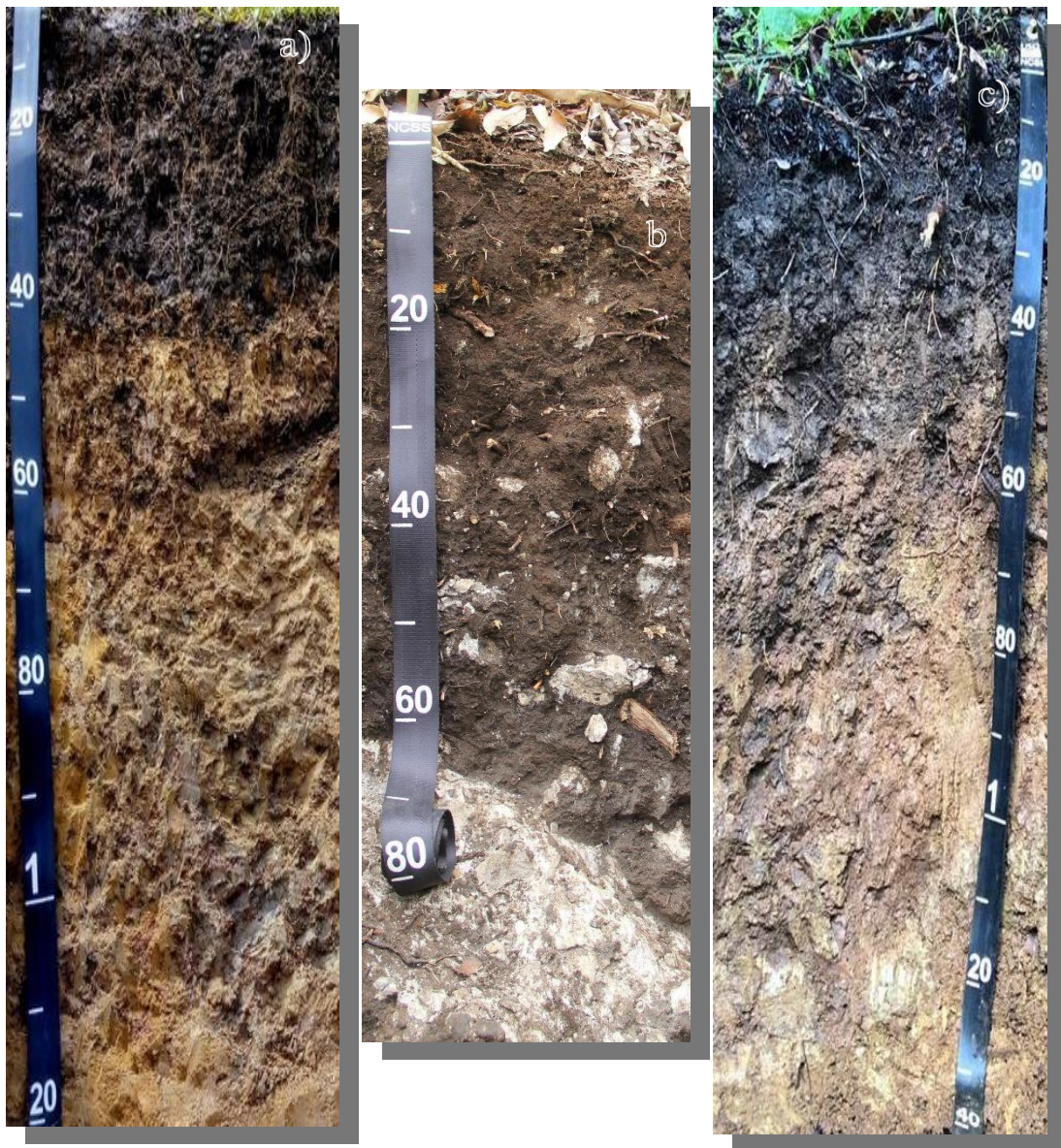


Figura 4. Perfiles de suelos descritos en Ojo de agua San Francisco: a) Cambic Phaeozem (Epiclasyic, Endoloamic) y Typic Hapludolls; b) Follic Cambic Mollic Umbrisol (Clayic, Hyperhumic) y Typic Humdepts; c) Cambic Phaeozem (Epiclasyic, Endoloamic, Hyperhumic) y Typic Hapludolls.



El suelo descrito en el pastizal (Figura 4a) se encuentra en la parte media de la ladera con orientación NE y una inclinación de 25°. Presenta en sus horizontes genéticos Ap1 y Ap2 una estructura granular y en bloques subangulares, un contenido de COS de 7.31 % y 3.91% respectivamente, con un croma en húmedo  $\leq 3$ , una saturación de bases ponderada  $>50\%$  y un espesor de 41 cm (Tabla 1 y 2), por lo que se designó como un epipedón móllico. Además, su saturación de bases intercambiables es  $>50\%$  hasta los 100 cm por lo que el Grupo Referencial de Suelo (GSR) es Phaeozem. Los horizontes genéticos 2Bwg1 y 2Bwg2 tienen una textura franca, ausencia de pedregosidad y muestran una alteración edafogenética ya que el contenido de arcilla absoluto es de 23.5 %, que es mayor al contenido de arcillas del horizonte 3Cg (14.1%) y tienen un espesor en conjunto de 69 cm (Tabla 2) por lo que se caracterizó como un horizonte cámbico. Además, la dominancia de la textura arcillosa en los horizontes Ap1 y Ap2; y la textura franca en los horizontes 2Bwg1, 2Bwg2 y 3Cg le da al suelo los calificadores Epiclayic y Endoloamic respectivamente. El suelo se clasificó como un Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic) por la WRB (2015) y como Typic Hapludolls por la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014).

Se observan procesos predominantemente fisicogénicos en la estructura del horizonte 2Bwg1 y 2Bwg2 debido a la presencia de bloques angulares grandes y muy grandes (Figura 5); procesos físicogénicos y biogénicos en el horizonte Ap2 que se expresan en bloques subangulares gruesos; y procesos biogénicos en el horizonte Ap1 que se denotan en una estructura granular fina y media debido a la alta actividad de las raíces medias que redondean y forman los agregados.



Figura 5. Bloques subangulares y angulares del horizonte 2Bwg1 y 2Bwg2 con presencia de concreciones de manganeso.

Tabla 1. Propiedades morfológicas, físicas y químicas en campo de los perfiles tipo de la microcuenca “Ojo de agua San Francisco”.

Hor	Prof cm	pH 1:2.5	Color		Textura	Estructura			Poros	Rasgos
			Seco	Húmedo	Clase	Tipo	Tamaño	Des.		
<b>Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic)</b>										
<b>Ap1</b>	0-10/11	5.50	10YR 3/2	10YR 2/2	FR	G	m y f	Mod	Inped/finos/ comunes	
<b>Ap2</b>	10/11-35/41	5.63	10YR 3/3	10YR 4/3	FR	BSA	g y f	Fuerte	Intersticiales/muy finos	
<b>2Bwg1</b>	35/41-51/65	6.02	10YR 6/6	10YR 3/6	FR	BA	g	Fuerte	Intersticiales/ finos/pocos	Rev. 2.5Y 5/4 y gley1 6/10Y; manganeso
<b>2Bwg2</b>	51/65-104/116	6.27	10YR 6/6	10YR 4/6	F	BA	g	Mod	Intersticiales/ finos/comunes	Concreciones de manganeso
<b>3Cg</b>	104/116-120	6.33	10YR 6/4	10YR 3/6	F	MASIVA	-	-		
<b>Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic, Hyperhumic)</b>										
<b>Ah1</b>	0-10/15	6.85	10YR 3/3	10YR 2/2	F	BSA→M	m→f	Mod	Intersticiales/ comunes	
<b>Ah2</b>	10/15-39/42	6.46	10YR 4/4	10YR 3/3	R	BSA	mg→g	Mod	Intersticiales/ comunes	
<b>2ABw</b>	39/42-69/71	6.36	10YR 6/6	10YR 4/6	FR	BA y BSA	m	Mod	Intersticiales/muy pocos	
<b>3Bw</b>	69/71-94	5.98	10YR 6/6	10YR 4/6	FR	BA	mg	Mod	Intersticiales/muy pocos	Concreciones de manganeso
<b>3CB</b>	94-125	6.04	10 YR 6/6	10YR 4/6	RL	BA	mg	Fuerte		
<b>Folic Cambic Mollic Umbrisol (Clayic, Hyperhumic)</b>										
<b>O</b>	14/16-0									
<b>Ah</b>	0-4/7	6.66	7.5YR 3/2	7.5YR 2/2	FR	BSA→G	g→m	Fuerte	Intersticiales/muy finos /comunes	
<b>2Ah</b>	4/7-37/43	6.91	10YR 3/2	10YR 2/2	FRL	G	m	Fuerte	Intersticiales/ finos/muchos	
<b>2AB</b>	37/43-52/54	7.26	10YR 3/2	10YR 2/1	FR	BA→BSA	m	Fuerte	Intersticiales/ finos/pocos	
<b>2BC</b>	52/54-65/90	7.27	10YR 3/2	10YR 2/2	FL	BA	m	Mod	Vesiculares/ finos/pocos	
<b>R</b>	94-125		-	-						
<p>FR: franco-arcillosa; F: Franca; R: arcillosa; RL: arcillo-limosa; FRL: franco-arcillo limosa; FL: Franco limosa.                      G: granular; M: migajosa; BA: bloques angulares; BSA: bloques subangulares.                      f: finos; m: medios; g: gruesos; mg: muy gruesos; Mod: moderado</p>										

El suelo descrito en el Acahual (Figura 4c) está ubicado en la ladera media con orientación de 25°. En los horizontes genéticos Ah1 y Ah2 presenta una estructura granular y en bloques subangulares, un contenido de COS de 11.78 % y 3.72% respectivamente, con un croma en húmedo  $\leq 3$ , una saturación de bases ponderada de 68.75% y un espesor de 42 cm (Tabla 1 y 2) por lo que se designó como un epipedón móllico. Además, su saturación de bases intercambiables es  $>50\%$  hasta los 100 cm por lo que el GRS es Phaeozem. Los horizontes 2ABw y 3Bw tienen una textura franca arcillo arenosa y franca arenosa, ausencia de pedregosidad y muestran una alteración edafogenética, ya que el contenido de arcilla absoluto es del 18.1 %, que es mayor al contenido de arcillas del horizonte 3CB (12.9%) y tienen un espesor en conjunto de 65 cm (Tabla 2) por lo que se caracterizó como un horizonte cámbico. Además, la dominancia de la textura arcillosa en los horizontes Ah1 y Ah2 y la textura franca en los horizontes 2ABw y 3Bw le da al suelo los calificadores Epiclayic y Endoloamic respectivamente. El suelo se clasificó como un Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic, Hyperhumic) por la WRB (2015) y como un Typic Hapludolls por la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014).

Se observan procesos predominantemente fisicogénicos en la estructura del horizonte 3Bw que se expresa en bloques angulares muy gruesos y de grado moderado; procesos físicogénicos y biogénicos en el horizonte Ah2 que se denotan en bloques subangulares muy gruesos y gruesos de desarrollo moderado; y procesos biogénicos en el horizonte Ah1 que se manifiestan en una estructura migajosa y en bloques subangulares de desarrollo moderado (Figura 6) debido a la alta actividad de la fauna edáfica y de las raíces que redondean y forman los agregados.



Figura 6. Bloques subangulares finos y medios de los horizontes Ah1 y Ah2.

El tercer perfil (Figura 4b) está ubicado en la ladera media con orientación de 75° al NE con una inclinación de 37°. En sus horizontes Ah, 2Ah y 2AB presenta una estructura granular y en bloques subangulares, un contenido de COS de 13.46 %, 11.77% y 5.95% con un croma en húmedo  $\leq 3$ , una saturación de bases ponderada de 54.45% y un espesor de 52 cm (Tabla 1 y 2) por lo que se caracterizó como un epipedón móllico. La saturación de bases intercambiables es de 49.87% hasta los 100 cm por lo que el GRS es Umbrisol. En campo se describió el horizonte orgánico (O), con espesor de 14-16 cm, el cual no se encontraba saturado, por lo que se designó como un horizonte fólico. Los horizontes 2AB y 2BC tienen una textura arcillo limosa y franco arcillosa, y una pedregosidad de 10%, que muestran una alteración edafogenética ya que tienen una estructura en bloques subangulares y angulares medios con un croma  $\geq 1$  más alto que el material parental y una profundidad de 38 cm (Tabla 2) por lo que se caracterizó como un horizonte cámbico. Además, la dominancia de la textura arcillosa en los horizontes Ah1 y 2Ah; y la textura franca en los horizontes 2AB y 2BC le da al suelo los calificadores Epiclayic y Endoloamic respectivamente. El suelo se clasificó como un Follic Cambic Phaeozem (Clayic, Hyperhumic) por la WRB y como Typic Humudepts en la Soil Taxonomy.

Se observan procesos predominantemente físicos y biogénicos que se expresan en la estructura en bloques angulares medios que rompen a bloques subangulares en el horizonte 2AB; procesos biogénicos en los horizontes Ah y 2Ah que se denotan en agregados granulares gruesos y medios con un desarrollo fuerte (Figura 7); y procesos fisicogénicos en el horizonte 2BC que se manifiestan en una estructura en bloques angulares.



Figura 7. Agregados granulares medios, finos y muy finos de los horizontes Ah y 2Ah.

Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de los perfiles tipo de la microcuenca “Ojo de agua San Francisco”.

Hor	Prof cm	pH 1:2.5	CO	N	DA g cm <sup>-3</sup>	Textura				Bases intercambiables					Saturación de bases %
			g kg <sup>-1</sup>			A	L	R	Tipo	Ca	Mg	Ca/Mg	K	Na	
						%				cmol (+) kg <sup>-1</sup>					
<b>Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic)</b>															
<b>Ap1</b>	0-10/11	5.50	73.7±1.8	2.45±0.9	0.92	2.7	25.3	72.0	R	32.13	23.67	1.36	0.92	0.10	75.08
<b>Ap2</b>	10/11-35/41	5.63	39.1±0.7	0.85±0.1	0.90	3.4	27.1	69.5	R	30.57	21.53	1.42	0.28	<l.c.	64.54
<b>2Bwg1</b>	35/41-51/65	6.02	1.93	-	1.30	40.1	38.9	21.0	F	44.46	31.06	1.43	<l.c.	0.03	100
<b>2Bwg2</b>	51/65-104/116	6.27	1.55	-	1.46	39.9	34.1	26.0	F	47.42	35.35	1.34	<l.c.	0.78	100
<b>3Cg</b>	104/116-120	6.33	0.39	-		63.7	22.3	14.1	F	57.13	41.68	1.37	<l.c.	<l.c.	100
<b>Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic, Hyperhumic)</b>															
<b>Ah1</b>	0-10/15	6.85	117.85±7.0	3.21±1.5	0.62	1.4	33.6	65.0	R	52.36	20.41	2.56	1.58	1.61	59.33
<b>Ah2</b>	10/15-39/42	6.46	37.24±1.7	1.03±0.5	0.72	5.5	31.3	63.2	R	36.46	18.72	1.93	1.53	<l.c.	78.17
<b>2ABw</b>	39/42-69/71	6.36	2.32	-	0.98	56.0	20.0	23.9	FRA	48.41	28.41	1.70	0.71	<l.c.	100
<b>3Bw</b>	69/71-94	5.98	1.55	-	1.18	75.6	12.1	12.3	FA	60.36	42.49	1.42	3.03	0.08	100
<b>3CB</b>	94-125	6.04	-	-	-	71.3	15.8	12.9	FA	57.10	38.30	1.49	0.30	<l.c.	59.33
<b>Folic Cambic Mollic Umbrisol (Clayic, Hyperhumic)</b>															
<b>Ah</b>	0-4/7	6.66	134.63±5.5	1.93±1.7	0.61	7.7	34.7	57.7	R	39.61	17.15	2.31	0.36	<l.c.	42.94
<b>2Ah</b>	4/7-37/43	6.91	117.76±4.5	1.52±0.5	0.92	10.2	51.3	38.4	RL	44.17	18.88	2.34	0.28	0.09	53.49
<b>2AB</b>	37/43-52/54	7.26	59.58	-	0.70	9.9	43.4	46.7	RL	42.95	17.53	2.45	0.40	29.10	70.33
<b>2BC</b>	52/54-65/90	7.27	53.15	-	-	22.3	36.0	41.7	FR	18.17	16.00	2.24	0.28	<l.c.	36.69
<b>R</b>	94-125														

CO: carbono orgánico; DA: densidad aparente; A: arena; L: limo; R: arcilla/arcillosa; FRL: franco arcillo limosa.

## 4.2 Micromorfología

La interpretación de las láminas delgadas de cada horizonte permitió obtener una evidencia más de los procesos edafogénicos derivados de la actividad biológica y de la humificación de CO del sitio.

### 4.2.1 Cambic Phaeozem (*Epiclagic, Endoloamic*)- Pastizal

En el horizonte Ap1 se observa una estructura pedal biogénica de bloques subangulares compuestos por agregados granulares que rompen en migajones finos, con poros fisura, de empaquetamiento compuesto y cavidades intra agregados de moderado y fuerte desarrollo (Figura 8). También se observa un alto contenido de fracciones gruesas de componentes orgánicos como raíces y tejidos parenquimáticos con una preservación de 98%, material amorfo orgánico con una frecuencia de 8%, relacionado con la humificación de CO, y una gran cantidad de excrementos derivados de una alta actividad biológica (Tabla 3).

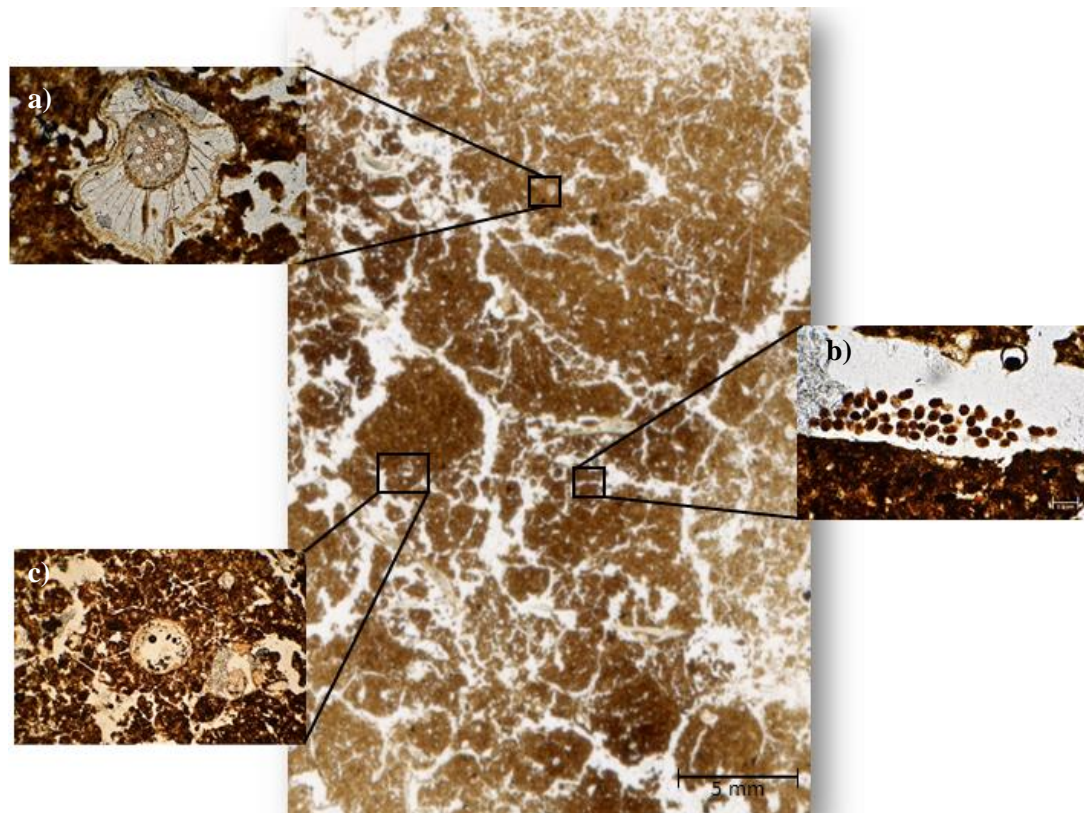


Figura 8. Sección delgada del horizonte Ap1 del Phaeozem en el pastizal en donde se observa una estructura en bloques subangulares, migajosa y granular; a) raíz entre agregados granulares, bien conservada; b) bioporo relleno de excrementos globulares; c) Agregados granulares tamaño arenas medias (500-200 μm).

En el horizonte Ap2 se observa una estructura pedal biogénica en bloques subangulares que colapsan a microagregados granulares finos. Los poros son de empaquetamiento compuestos y cavidades debido a una alta densidad de raíces (Figura 9). La presencia de componentes orgánicos gruesos y de amorfos disminuye en comparación con el horizonte suprayacente. Sin embargo, se sigue observando una gran actividad biológica por la cantidad de excrementos encontrados (Tabla 3). También se ven pequeños carbones dentro de los agregados.

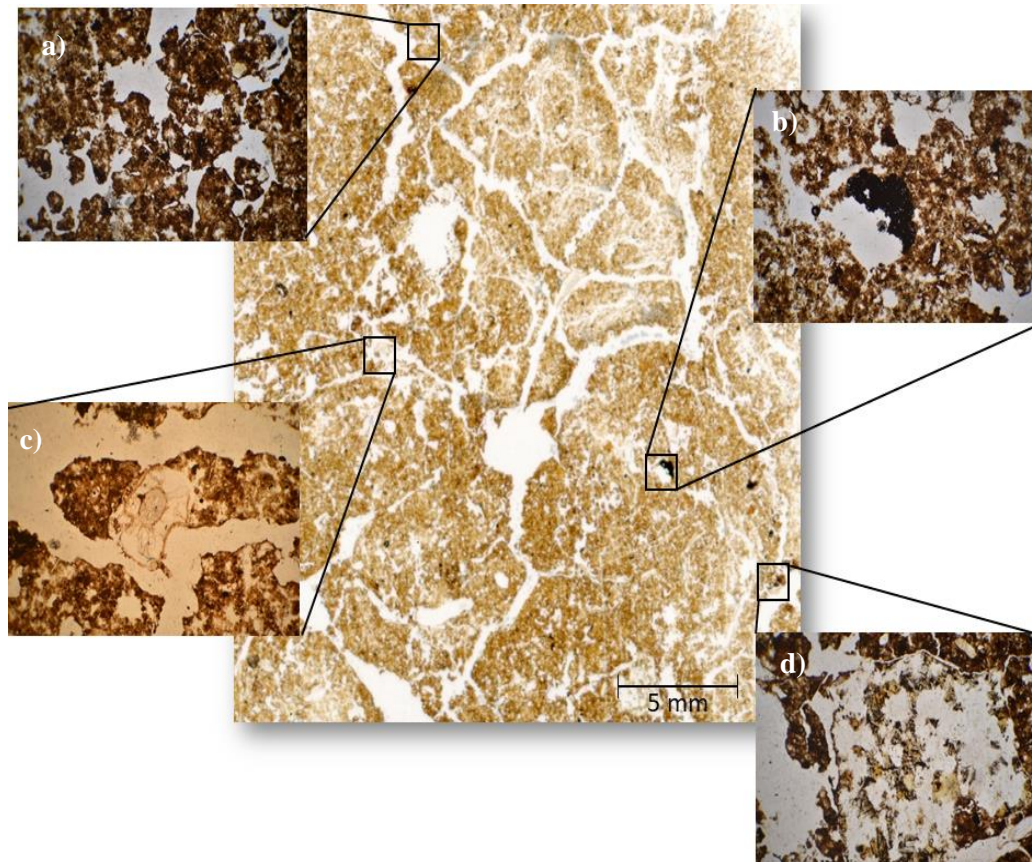


Figura 9. Sección delgada del horizonte Ap2 del Phaeozem en el pastizal con una estructura compleja de agregados granulares y subangulares; a) agregados subangulares de moderado desarrollo con material fino amorfo globular dentro de los agregados; b) agregados granulares moderadamente desarrollados con residuo de material carbonizado en el centro; c) material orgánico grueso con 80% de preservación; d) grano mineral anhedral.

Tabla 3. Descripción micromorfológica en láminas delgadas de cada horizonte.

Hor.	Estructura		Componentes orgánicos		Rasgos pedológicos		
	Agregados	Poros	Fración gruesa	Material fino amorfo	Amorfos	Texturales	Excrementos
<b>Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic)</b>							
Ap1	G/M	EC/Cn/Cv	XXX	XX			XXX
Ap2	G/BSA	EC/Cv	XX	XX			XX
2Bwg1	BSA	EC/F/Cv	X	X		X	X
2Bwg2	BA/BSA	EC/F	Xc			XX	
3Cg	BA	F		X		XXX	
<b>Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic, Hyperhumic)</b>							
Ah1	G/M	EC/ Cv	XXX	XX			XXX
Ah2	G/M	EC/ Cv	XX	XX	X		XX
2ABw	G/BSA	EC/F	X	X	X	X	
3Bw	BA/BSA	EC/F/Cv		X		XX	
3CB	-	-	-	-	-	-	-
<b>Folic Cambic Mollic Umbrisol (Clayic, Hyperhumic)</b>							
Ah	BSA/G	EC/Cv	XXX	XX			XXX
2Ah	G	EC	XX	X			XXX
2AB	BSA/G	EC/Cv	XX	X			XXX
2BC	BSA	EC/F	X	X	X		XX
R							

G: granular; BSA: bloques subangulares; BA: bloques angulares; M: migajosa; EC: empaquetamiento compuesto; Cn: canales; Cv: cavidades; F: fisuras; c: carbón; X: pocos, XX: moderados; XXX: abundantes.

#### 4.2.2 Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic, Hyperhumic)-Acahual

La estructura del horizonte Ah1 es pedal biogénica, de agregados granulares de moderada a fuertemente desarrollados de tamaño arenas gruesas, y agregados migajosos de tamaño arenas medias (500-200  $\mu\text{m}$ ) y finas (>50  $\mu\text{m}$ ) con distribución enáulica. Los poros son de empaquetamiento compuesto y cavidades. También se observan componentes orgánicos gruesos con alto grado de desmenuzamiento (>70%) y preservación de 30%, y amorfos orgánicos de forma globular de superficie rugosa, color opaco y frecuencia de 10% (Figura 10). Se observa gran actividad biológica por la cantidad de excrementos encontrados (Tabla 3).



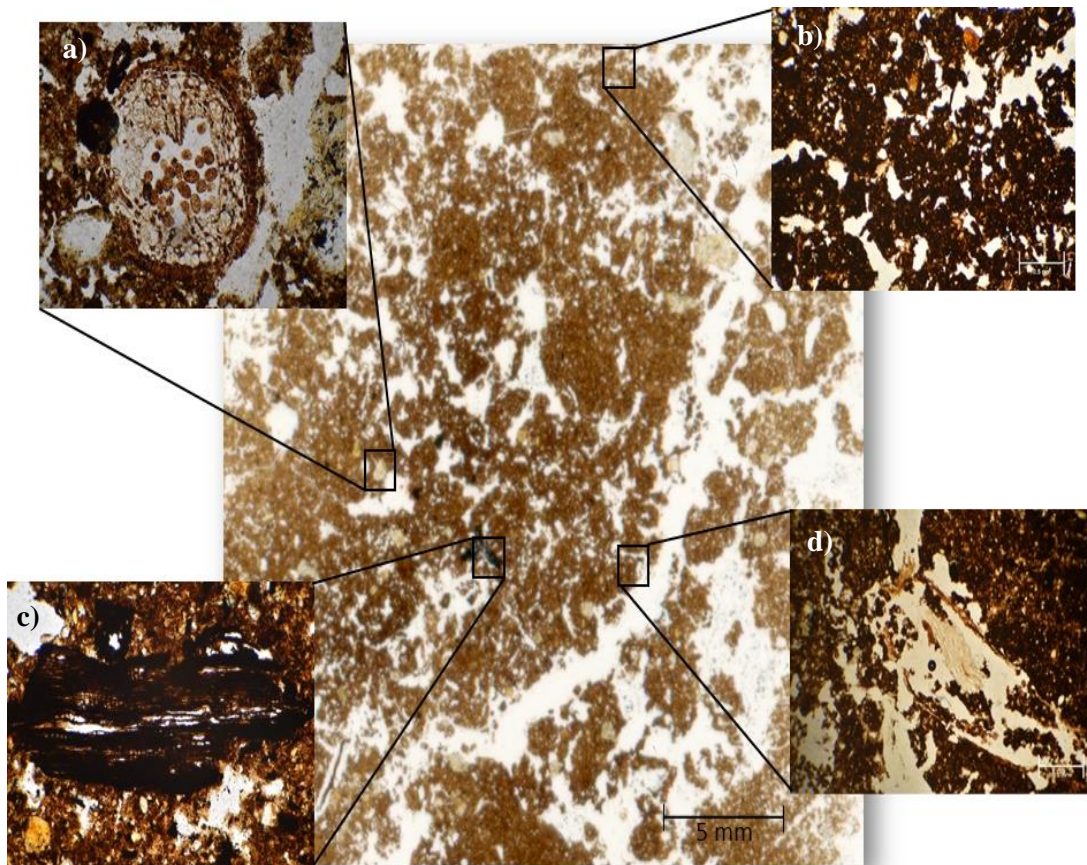


Figura 10. Sección delgada del horizonte Ah1 del Phaeozem en el acahual compuesta por agregados migajosos y granulares; a) relleno de excrementos en grupo en el centro de la raíz; b) agregados granulares y migajosos, moderadamente desarrollados; c) material orgánico carbonizado; d) agregados granulares y contorno de raíz.

En el horizonte Ah2 la estructura es pedal biogénica, de agregados granulares de moderados a fuertemente desarrollados, de tamaño arenas medias (500-200  $\mu\text{m}$ ) y finas (200-50  $\mu\text{m}$ ) que rompen a agregados migajosos moderadamente desarrollados de arenas finas (>50  $\mu\text{m}$ ) con una distribución enáulica. Los poros son de empaquetamiento compuesto, complejo por la presencia de arenas y cavidad debido a la alta actividad biológica que colapsa a los agregados (Figura 11). Los componentes orgánicos gruesos tienen una menor abundancia que el horizonte suprayacente con una preservación de 98%; sin embargo, la presencia de amorfos orgánicos se mantiene dando evidencia de procesos de humificación (Tabla 3).

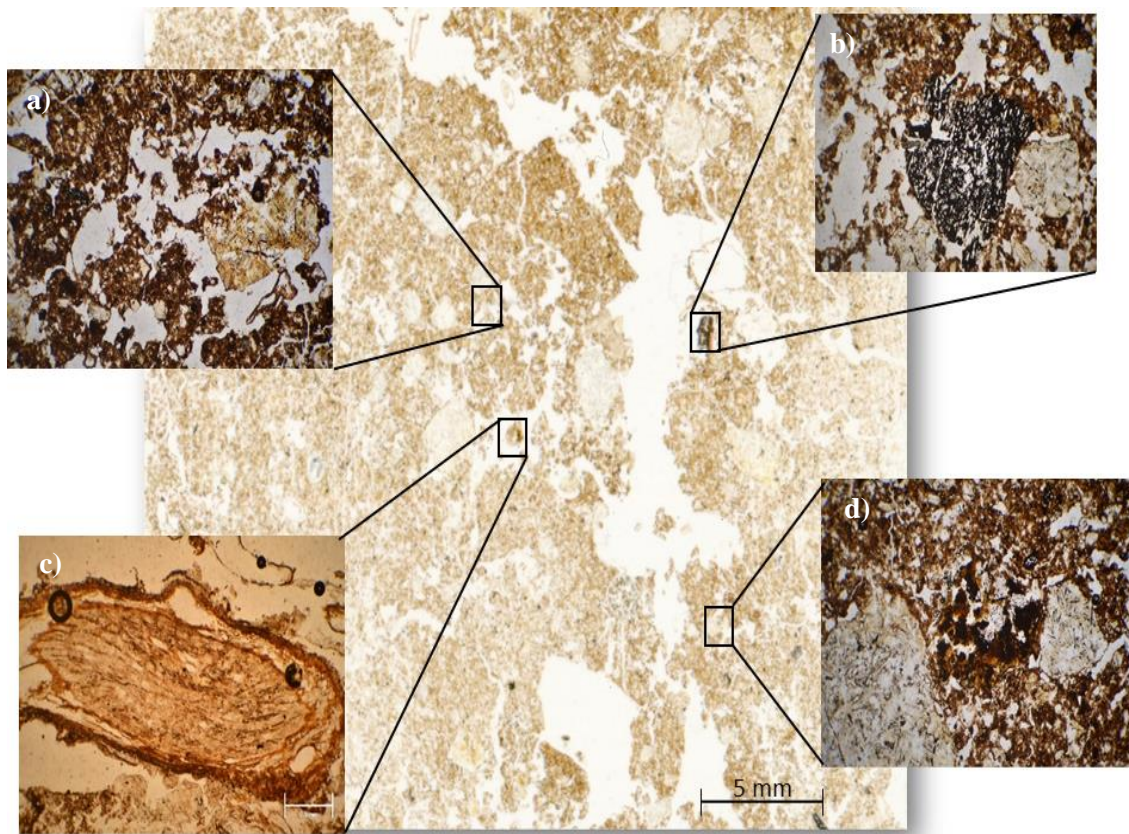


Figura 11. Sección delgada del horizonte Ah2 del Phaeozem en el acahual donde se muestra su estructura biogénica, migajosa y granular; a) agregados granulares y migajosos, moderadamente desarrollados; b) material orgánico carbonizado; c) tejido parenquimático de residuo de raíz, moderadamente preservada; d) acumulación de arcilla entre agregados.

#### ***4.2.3 Follic Cambic Mollic Umbrisol (Clayic, Hyperhumic)- Bosque***

En el horizonte Ah la estructura es pedal biogénica de agregados subangulares de moderada a fuertemente desarrollados, de tamaño arenas gruesas ( $\sim 2000 \mu\text{m}$ ) que se conforman de microagregados granulares de moderado a fuertemente desarrollados, de tamaño arenas finas ( $200\text{-}50 \mu\text{m}$ ) y limos ( $<50 \mu\text{m}$ ) con frecuencia de 60% y distribución enáulica. Los poros son de empaquetamiento compuesto con frecuencia de 30% y también se observan poros fisuras de moderado acomodamiento. También se observan componentes orgánicos gruesos de tejido parenquimático con bajo grado de desmenuzamiento ( $<2\%$ ), preservación de 98% y amorfos orgánicos de forma globular de superficie rugosa, color opaco y frecuencia de 10% que se encuentran dentro de los agregados (Figura 12). Además, el horizonte muestra gran actividad biológica por la cantidad de excrementos encontrados relleno los poros (Tabla 3).

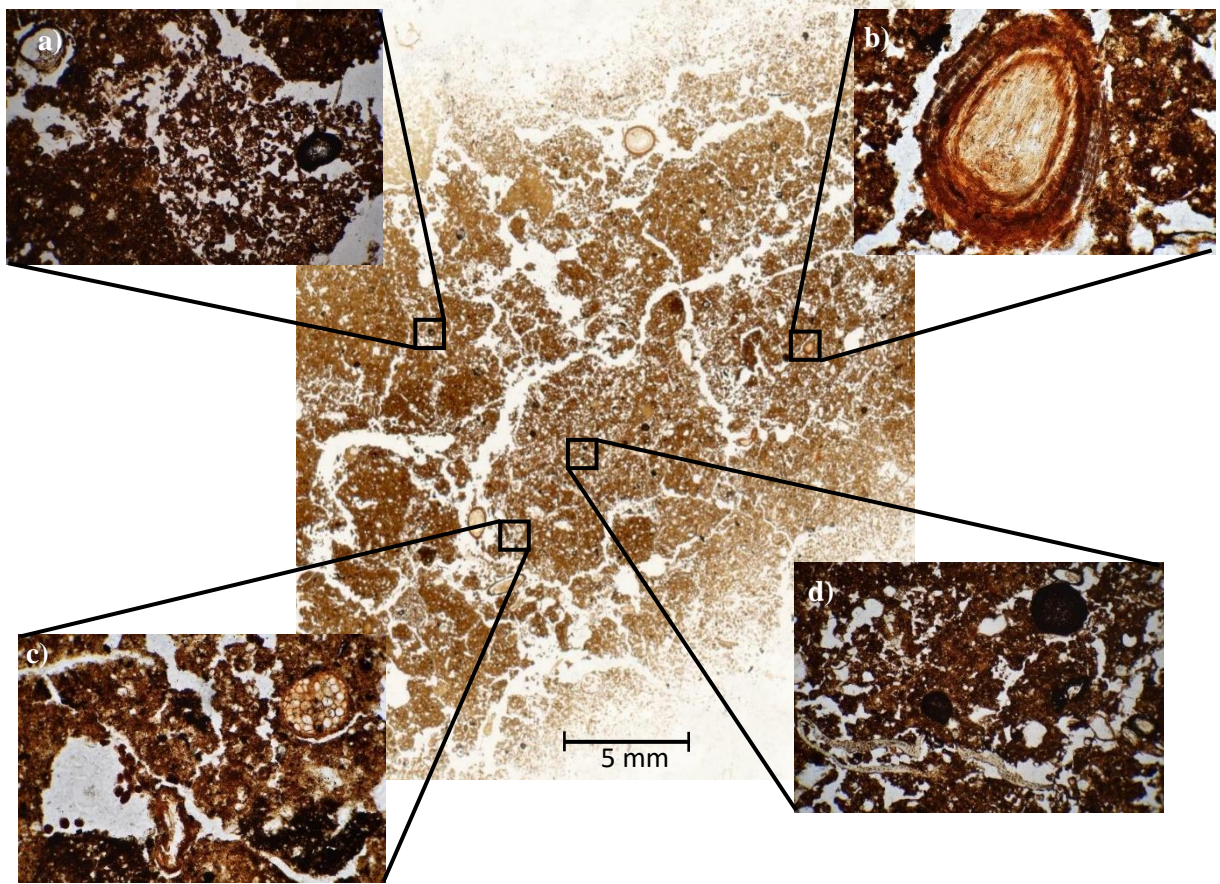


Figura 12. Sección delgada del horizonte Ah del Umbrisol en el bosque en donde se muestra su estructura en bloques subangulares y agregados granulares; a) agregados granulares fuertemente desarrollados dentro de bloques subangulares; b) tejido de raíz, moderadamente descompuesto con agregados esferoidales; c) agregados subangulares con rellenos de excrementos esferoidales; d) amorfos de material fino orgánico entre agregados granulares.

La estructura es pedal biogénica en el horizonte 2Ah, con agregados granulares fuertemente desarrollados de tamaño arenas medias (500-200  $\mu\text{m}$ ) y arenas finas (200-50  $\mu\text{m}$ ), con frecuencia de 55%; distribución relacionada enáulica. Los poros son de empaquetamiento compuesto de  $\sim 30$   $\mu\text{m}$  con frecuencia de 35% y arreglo aleatorio. También se observan componentes orgánicos gruesos de tejido parenquimático del tamaño de 1 mm con desmenuzamiento  $< 2\%$  y con preservación de 98%, y amorfos orgánicos de forma globular de superficie rugosa, color opaco y frecuencia de 8% que se encuentran dentro de los agregados (Figura 13). La actividad biológica es alta debido a la cantidad de excrementos de forma elipsoidal, con una superficie moderadamente rugosa y de tamaño moderadamente delgado (180 x 100  $\mu\text{m}$ ). Tienen frecuencia de 25%, son de color pardo oscuro y pardo. Su patrón de distribución básica es agrupado y su

distribución relacionada es mónica (Tabla 3).

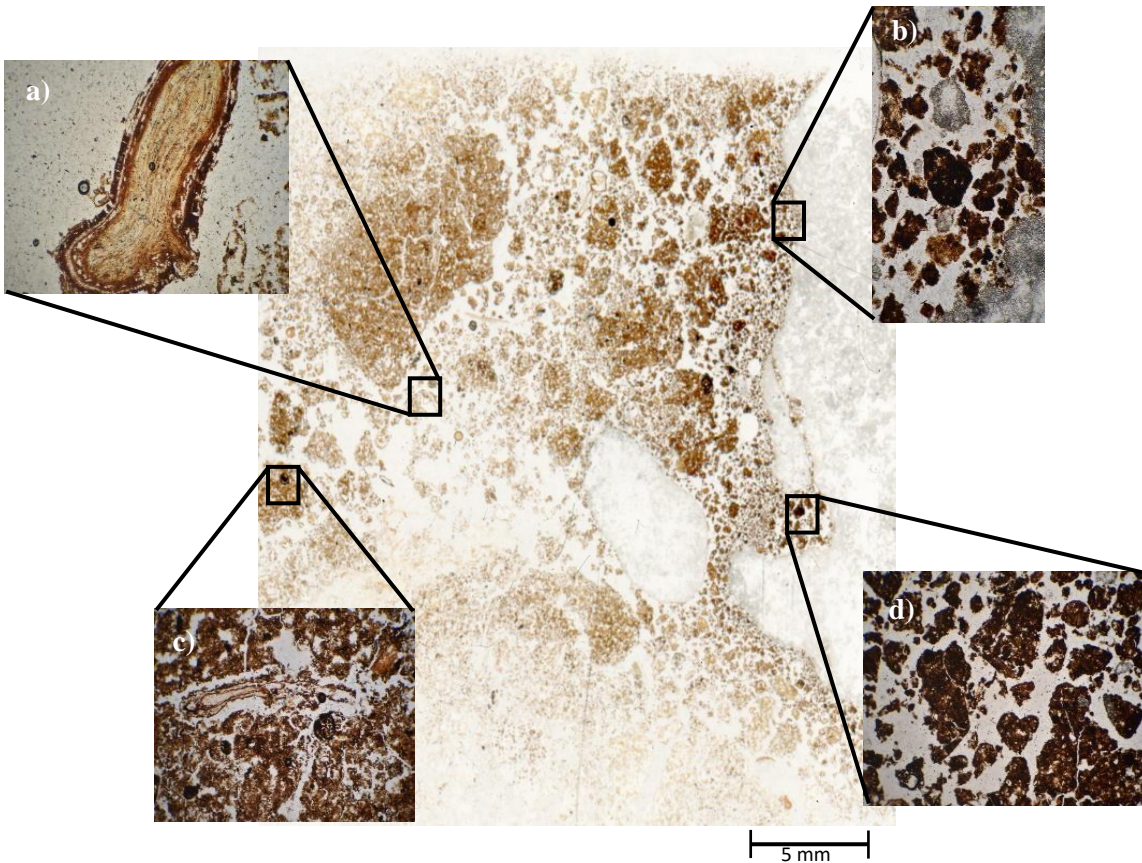


Figura 13. Sección delgada del horizonte 2Ah del Umbrisol en el bosque donde se observa su estructura biogénica, migajosa y granular; a) tejido orgánico bien preservado; b) agregados granulares y arenas de granos minerales; c) agregados granulares alrededor de residuos de una raíz con alto desmenuzamiento; d) agregados granulares fuertemente desarrollados.

### 4.3 Estabilidad de agregados relacionada con C y N

#### 4.3.1 Carbono orgánico y Nitrógeno total

El contenido de CO en el epipedón del pastizal es alto (>1 %) y su variación en la parcela es poca (Figura 14). El contenido de N es de  $2.45 \pm 0.9$  g kg<sup>-1</sup> en el horizonte Ap1 y de  $0.85 \pm 0.12$  g kg<sup>-1</sup> en el horizonte Ap2, con una relación C: N de 28.4:1 y 45.5:1 respectivamente. En el horizonte Ap2 el contenido de N disminuye y en consecuencia la relación C: N aumenta (Tabla 4).

Tabla 4. Contenidos de carbono orgánico (CO), nitrógeno total (N) y su relación C: N de los epipedones.

Hor	Prof cm	pH 1:2.5	CO g kg <sup>-1</sup>	N g kg <sup>-1</sup>	C: N
<b>Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic)</b>					
<b>Ap1</b>	0-10/11	5.50	73.7±1.8	2.45±0.9	28.4
<b>Ap2</b>	10/11-35/41	5.63	39.1±0.7	0.85±0.12	45.5
<b>Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic, Hyperhumic)</b>					
<b>Ah1</b>	0-10/15	6.85	117.85±7.01	3.21±1.41	36.8
<b>Ah2</b>	10/15-39/42	6.46	37.24±1.7	1.03±0.51	36.1
<b>Folic Cambic Mollic Umbrisol (Clayic, Hyperhumic)</b>					
<b>Ah</b>	0-4/7	6.66	134.63±5.5	1.93±1.74	69.8
<b>2Ah</b>	4/7-37/43	6.91	117.76±4.5	1.52±0.58	77.1

El contenido de CO en el horizonte Ah1 y Ah2 del Cambic Phaeozem en el acahual muestra procesos de humificación anteriormente mencionados. En el horizonte Ah1 la distribución del contenido de CO es más dispersa que en los demás horizontes de los otros suelos (Figura 14). El contenido de N es de 3.21±1.41 g kg<sup>-1</sup> en el horizonte Ah1 y de 1.03±0.51 g kg<sup>-1</sup> en el horizonte Ah2 con una relación C: N de 36.8:1 y 36.1:1 respectivamente (Tabla 4).

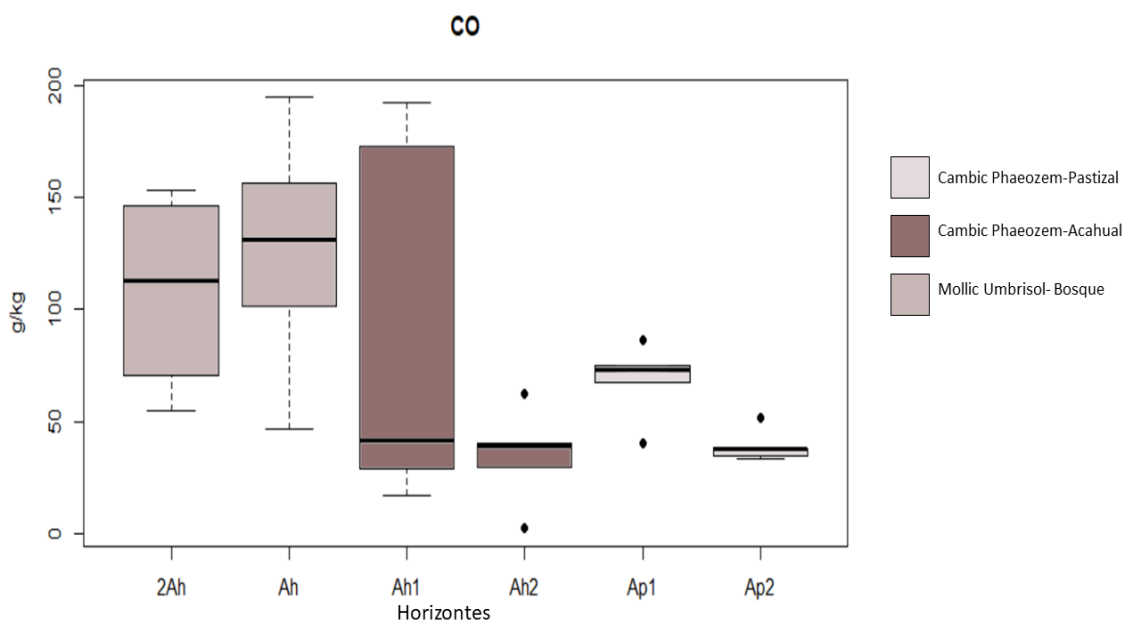


Figura 14. Variabilidad del contenido de CO de los epipedones (p=0.031\*).

En el bosque los horizontes Ah y 2Ah tienen un contenido de CO de  $134.63 \pm 5.5$  y  $117.76 \pm 4.5$  g  $\text{kg}^{-1}$  que, a pesar de ser alto, no se consideran horizontes orgánicos ya que el CO es  $< 20\%$  (WRB, 2015). En el horizonte Ah el CO muestra una distribución normal, con los bigotes más alargados (Figura 14). El contenido de N es de  $1.93 \pm 1.74$  g  $\text{kg}^{-1}$  en el horizonte Ah y de  $1.52 \pm 0.58$  g  $\text{kg}^{-1}$  en el horizonte 2Ah con una relación C: N de 69.8:1 y 77.1:1 respectivamente (Tabla 4).

#### **4.4 Estabilidad de agregados**

La mayor proporción de agregados después de la disrupción con agua se mantuvo en los macroagregados (tamaño  $>2000$   $\mu\text{m}$ ) con una proporción de 0.62 a 0.91 (Figura 15). La proporción de los mesoagregados está en el intervalo de 0.05 a 0.19 (Figura 16) y la menor proporción se obtuvo en los microagregados con  $<0.02$  (Figura 17).

En los macroagregados ( $>2000$   $\mu\text{m}$ ), la mayor dispersión de los datos corresponde a horizontes Ah y 2Ah del Mollic Umbrisol, donde los datos se encuentran en el 3er cuantil. En el acahual la dispersión de datos es caótica ya que no se observa la terminación del 3er cuantil en el horizonte Ah1 (Figura 15). El horizonte Ah2 muestra una distribución con un sesgo a la derecha y su mediana es parecida al horizonte 2Ah del Mollic Umbrisol. En los horizontes del Cambic Phaeozem del pastizal la distribución es homogénea en el horizonte Ap1, ya que su media está en el centro de la distribución y los bigotes son muy cortos. En el horizonte Ap2 la distribución es homogénea y la media es cercana al horizonte Ap1 (Figura 15).

Las medias de todos los horizontes se encuentran muy cercanas y al hacer un ANOVA de una vía no se encontraron diferencias significativas en la proporción de macroagregados ( $>2000$   $\mu\text{m}$ ) ( $F(5,54) = 1.394, p = 0.241$ ),

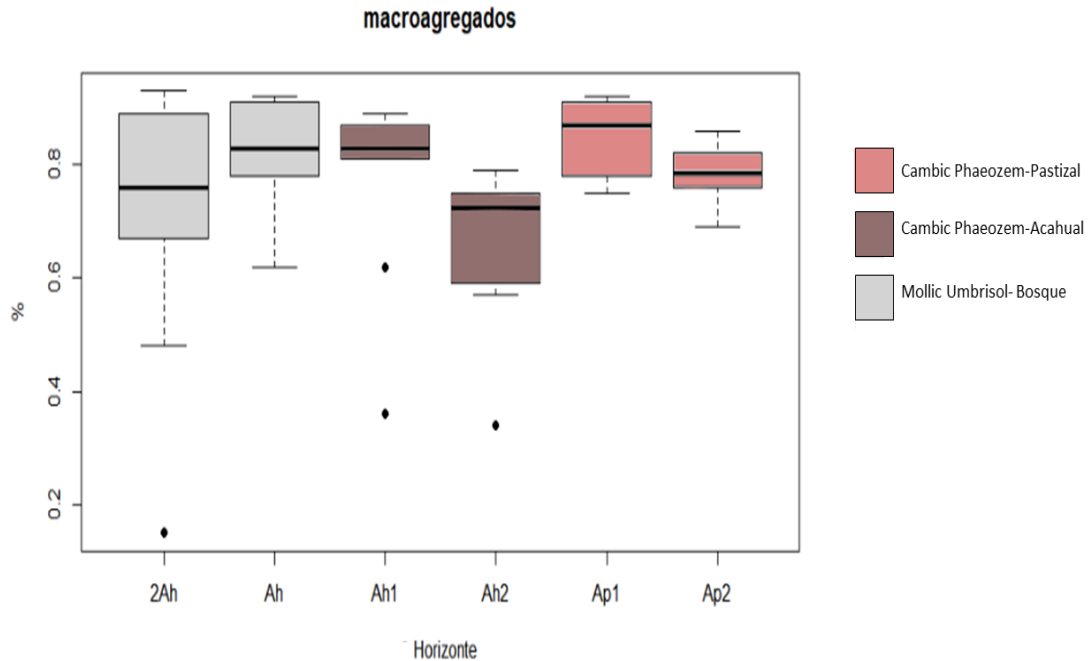


Figura 15. Proporción de macroagregados (>2000µm) de los horizontes superficial y subsuperficial ( $p>0.05$ ).

En los mesoagregados (2000-250 µm), la mayor dispersión de los datos está en los horizontes Ah1 y Ah2 del Cambic Phaeozem del achual, en donde se sesga a la derecha (Figura 16). En el horizonte Ah2 la media ( $0.18\pm 0.05$ ) es mayor a la del Ah1 ( $0.11\pm 0.04$ ) en donde la distribución de los datos se sesga a la izquierda. En el Mollic Umbrisol, el horizonte Ah ( $0.09\pm 0.02$ ) tiene una media similar al horizonte 2Ah ( $0.11\pm 0.04$ ), con una distribución más homogénea. En el caso del Cambic Phaeozem del pastizal la media del horizonte Ap1 está cercana al primer cuantil ( $0.09\pm 0.06$ ) y en el horizonte Ap2 la distribución está ligeramente sesgada a la izquierda y la media ( $0.07\pm 0.05$ ) es cercana a Ap1.

Las medias de todos los horizontes se encuentran muy cercanas y al hacer el ANOVA de una vía no se encontraron diferencias significativas en mesoagregados (2000-250 µm) ( $F(5,54)=0.973$ ,  $p=0.443$ ).

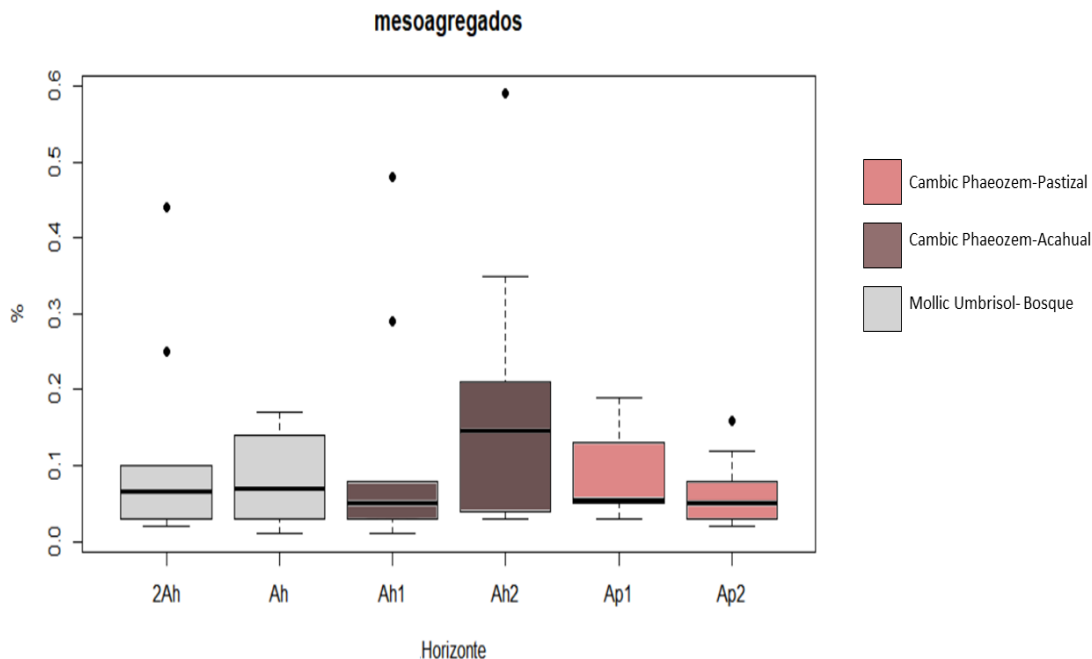


Figura 16. Proporción de mesoagregados (2000-250µm) de los horizontes superficial y subsuperficial ( $p>0.05$ ).

En los microagregados (250-53 µm), la mayor dispersión de los datos está en los horizontes 2Ah del Mollic Umbrisol del bosque ( $0.02\pm 0.01$ ), en donde la distribución de los datos se encuentra sesgada a la derecha (Figura 17). En el horizonte Ah la media indica ( $0.1\pm 0.002$ ) una distribución más homogénea de los datos; sin embargo, la media está cercana al horizonte subyacente. En el Cambic Phaeozem del acahual, el horizonte Ah1 ( $0.01\pm 0.001$ ) tiene una media similar al Ah2 ( $0.01\pm 0.002$ ). En el epipedón del pastizal, la media del horizonte Ap1 está cercana al primer cuantil ( $0.01\pm 0.009$ ) y en el Ap2 ( $0.02\pm 0.023$ ) la distribución está ligeramente sesgada a la izquierda.

Las medias de todos los horizontes se encuentran muy cercanas y al hacer el ANOVA de una vía no se encontraron diferencias significativas en los microagregados ( $F(5,54) = 1.088, p = 0.377$ ).



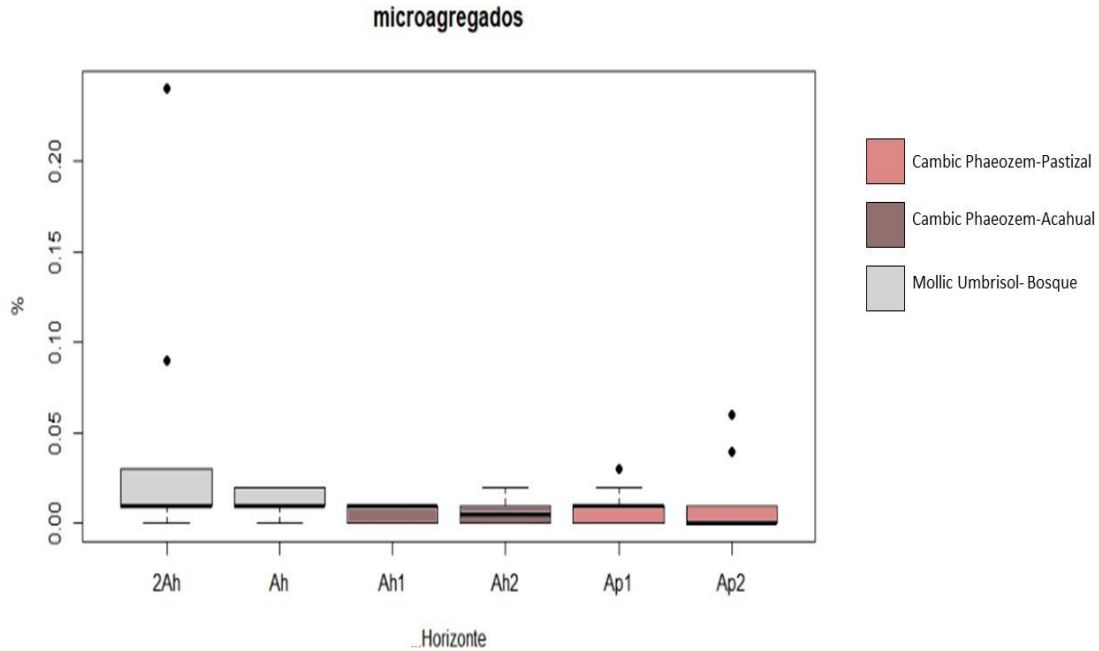


Figura 17. Proporción de microagregados (250-53  $\mu\text{m}$ ) de los horizontes superficial y subsuperficial ( $p > 0.05$ ).

#### 4.5 Materia orgánica particulada intra-agregados (i-MOP)

La materia orgánica particulada intra-agregados (i-MOP) es mayor en los horizontes superficiales. Con un orden secuencial de microagregados con mayor proporción de i-MOP, con respecto a meso y macroagregados.

En el pastizal, la mayor proporción de i-MOP en el horizonte Ap1 se encuentra en los microagregados ( $51.10 \pm 11.88$  %), seguido por los mesoagregados ( $8.28 \pm 2.79$  %) y macroagregados ( $0.86 \pm 0.23$  %). En el horizonte Ap2, la mayor proporción de i-MOP se encuentra en los microagregados ( $12.10 \pm 6.47$ %), seguido por los mesoagregados ( $3.86 \pm 1.27$  %) y macroagregados ( $0.50 \pm 0.11$  %); sin embargo, la proporción en este horizonte es considerablemente menor al horizonte suprayacente (Figura 18).

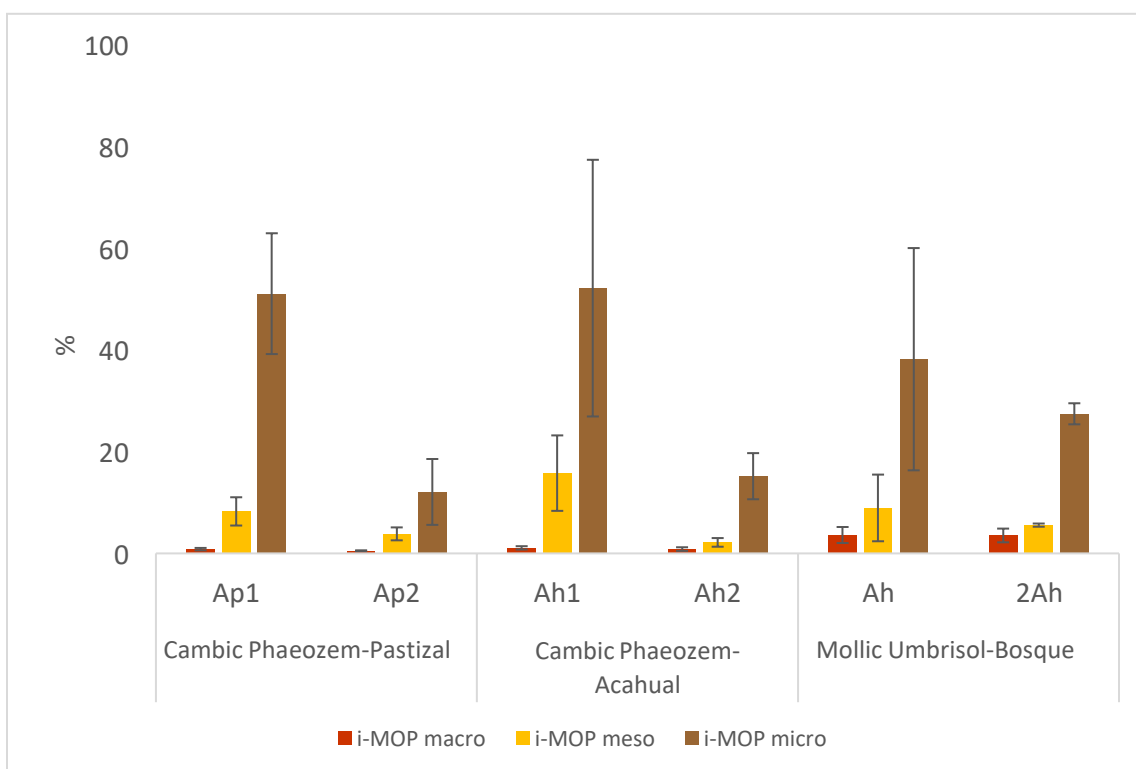


Figura 18. Gráfica de barras con las proporciones de i-MOP de macroagregados, mesoagregados y microagregados de los epipedones.

En los horizontes del epipedón del achual (Figura 18) se establece una secuencia mayoritaria, el horizonte Ah1 de i-MOP en los microagregados ( $52.18 \pm 25.25$  %) > mesoagregados ( $15.81 \pm 7.42$  %) > macroagregados ( $1.10 \pm 0.32$  %), mientras que en el subyacente la secuencia es similar: microagregados ( $15.18 \pm 4.54$  %) > mesoagregados ( $2.16 \pm 0.85$  %) > y macroagregados ( $0.84 \pm 0.36$  %) pero con mayor proporción con respecto al suprayacente.

En el caso del bosque (Figura 18) las proporciones de iMOP son microagregados ( $38.19 \pm 21.87$  %) > mesoagregados ( $8.92 \pm 6.56$  %) > macroagregados ( $3.60 \pm 1.58$  %). En el horizonte 2Ah la mayor proporción de i-MOP se encuentra en los microagregados ( $27.47 \pm 2.06$  %) > mesoagregados ( $5.56 \pm 0.32$  %) > macroagregados ( $3.53 \pm 1.35$  %); sin embargo, la proporción de la i-MOP en este horizonte es ligeramente menor al horizonte Ah.

En los tres suelos, la i-MOP es mayoritaria en los horizontes superficiales, siendo el horizonte Ah del Cambic Phaeozem del achual y Ah1 del Mollic Umbrisol del bosque los que muestran una mayor dispersión de los datos (Figura 18).

## 4.6 Sustancias húmicas

Las sustancias húmicas mostraron una mayor abundancia de carbono en los AF ( $C_{AF}$ ) de los tres suelos. En los horizontes del epipedón (Figura 19) del pastizal se observa que en el horizonte Ap1 el mayor contenido de CO está en los  $C_{AF} > C_{Hum} > C_{AH}$ . En el horizonte Ap2 la mayor proporción CO se encuentra en los  $C_{AF} > C_{Hum} > C_{AH}$  (Tabla 5).

Tabla 5. Distribución de CO en las sustancias húmicas.

Hor	Sustancias Húmicas			$C_{AH} : C_{AF}$	$C_{AH} + C_{AF} : C_{Hum}$
	$C_{AF}$	$C_{AH}$	$C_{Hum}$		
	g·kg <sup>-1</sup>				
<b>Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic)</b>					
<b>Ap1</b>	13.00 ±6.43	0.38±0.07	3.95±1.73	0.03	3.38
<b>Ap2</b>	19.82±4.21	0.54±0.23	4.36±1.99	0.03	4.67
<b>Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic, Hyperhumic)</b>					
<b>Ah1</b>	17.03±13.78	0.59±0.11	7.69±3.12	0.03	2.29
<b>Ah2</b>	13.57±6.72	0.37±0.14	7.29±3.56	0.03	1.91
<b>Folic Cambic Mollic Umbrisol (Clayic, Hyperhumic)</b>					
<b>Ah</b>	18.87±10.11	0.85±0.24	8.90±3.30	0.03	2.22
<b>2Ah</b>	19.79±1.35	0.54±0.01	8.10±3.14	0.03	2.51
$C_{AF}$ : Carbono orgánico en ácidos fúlvicos; $C_{AH}$ : Carbono orgánico en ácidos húmicos; $C_{Hum}$ : Carbono orgánico en huminas.					

En los horizontes del Cambic Phaeozem (Figura 19) del acahual se establece una secuencia de  $C_{AF} > C_{Hum} > C_{AH}$ . En el horizonte Ah2 la mayor proporción corresponde también al  $C_{AF}$ , seguido por el  $C_{Hum}$  y  $C_{AH}$  (Tabla 5). El mayor contenido de carbono orgánico en las SH está en el horizonte superficial.

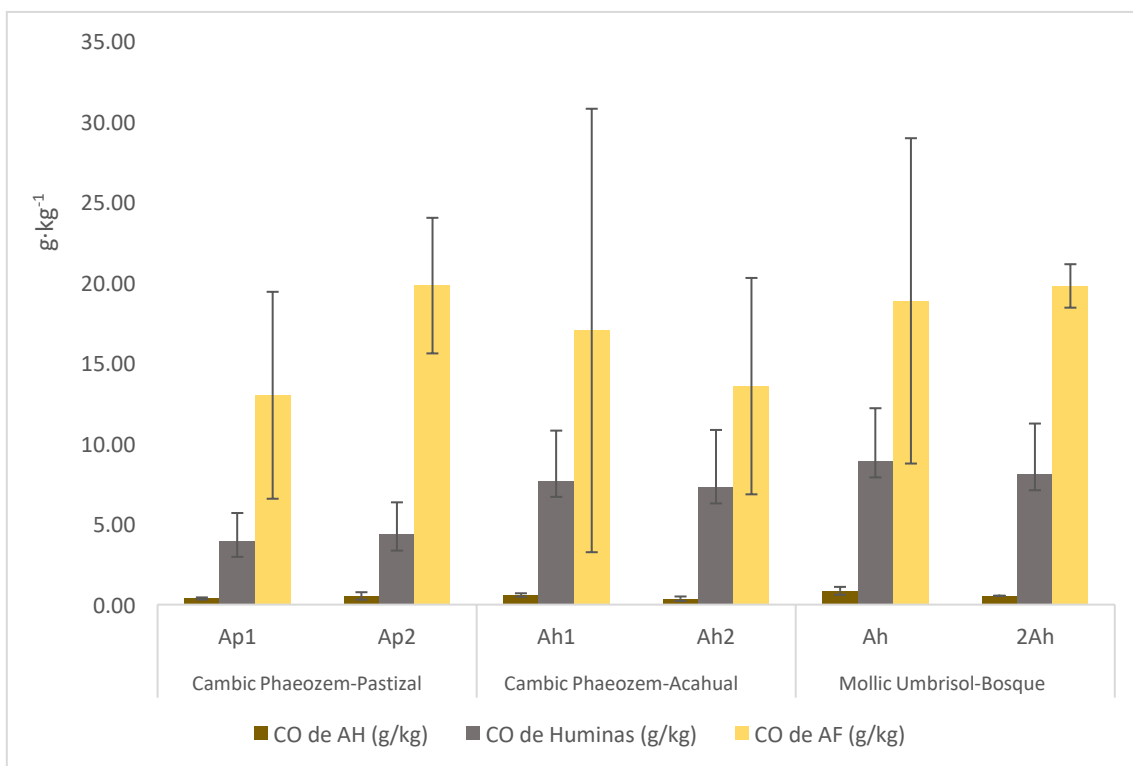


Figura 19. Distribución de las sustancias húmicas en los epipedones de los suelos estudiados.

En el Mollic Umbrisol (Figura 19) del bosque, el horizonte Ah tiene el mayor contenido de CO que se encuentra en los AF, seguido por el  $C_{Hum}$  y el  $C_{AH}$  (Tabla 5). En el horizonte 2Ah, la mayor proporción CO se encuentra en los  $AF > C_{Hum} > C_{AH}$  (Tabla 5). El mayor contenido de carbono orgánico en las SH se encuentra en el horizonte subsuperficial y también se observa que la variación de su contenido en la parcela es más cercana a la media que en los otros horizontes.

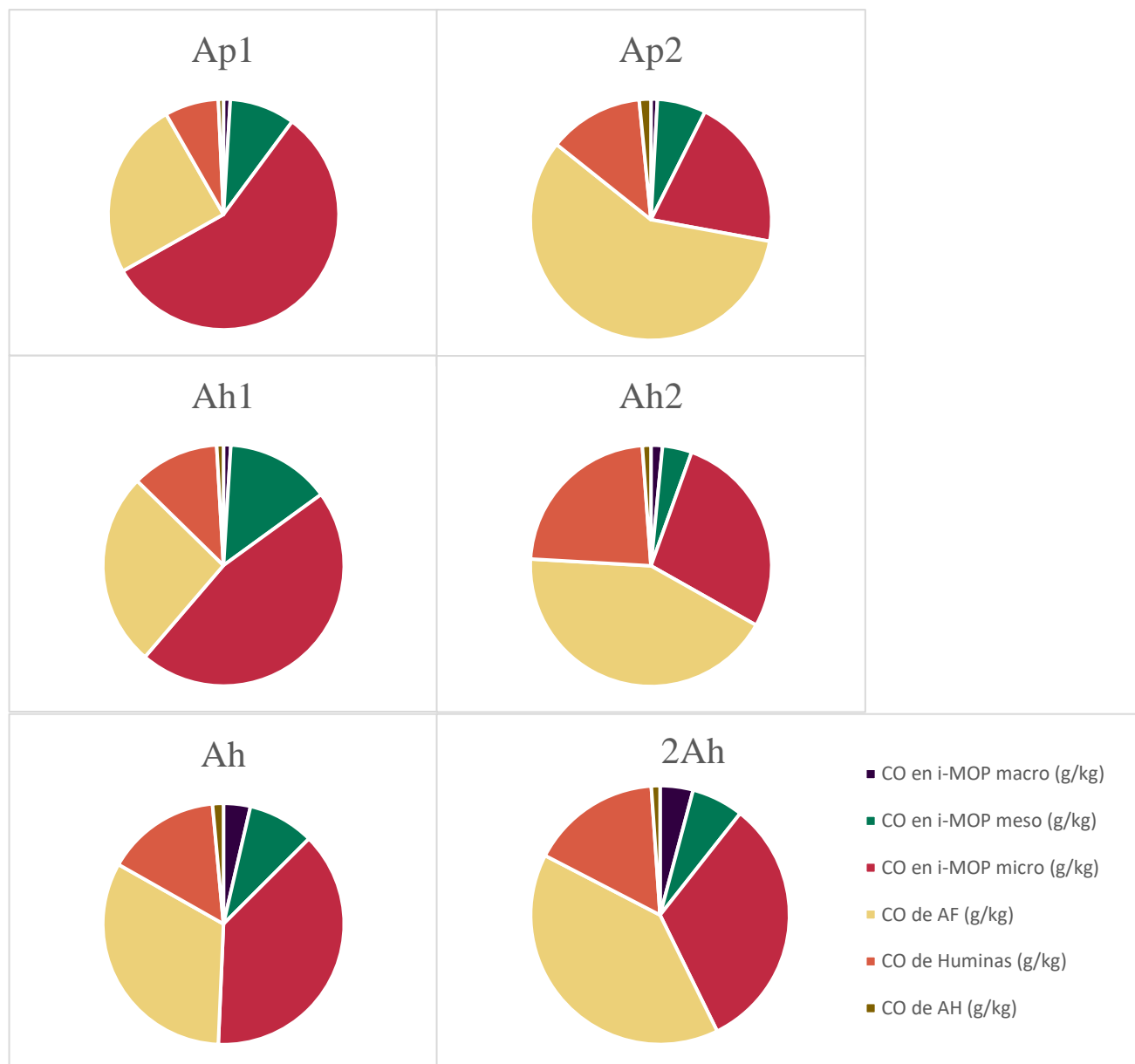


Figura 20. Proporción de CO en los horizontes superficiales (Ap1, Ah1 y Ah) y subsuperficiales (Ap2, Ah2 y 2Ah) en i-MOP de los macro, meso y microagregados, y en cada fracción de las sustancias húmicas.

En la Figura 20 se observa que la distribución de CO en los horizontes superficiales de los tres suelos (Ap1, Ah1 y Ah) es  $i\text{-MOP micro} > C_{AF} > C_{HUM} > i\text{-MOP meso} > i\text{-MOP macro} > C_{AH}$  y en los horizontes subsuperficiales (Ap2, Ah2 y 2Ah) es  $C_{AF} > i\text{-MOP micro} > C_{HUM} > i\text{-MOP meso} > i\text{-MOP macro} > C_{AH}$ . También se observa que la distribución cambia solamente en la proporción de i-MOP en micro y en el  $C_{AF}$  al comparar los horizontes superficiales con los subsuperficiales.

## Capítulo V

### 5.1 Discusión

#### 5.1.1 Procesos edafogénéticos y clasificación de suelos

Los tres suelos tienen un epipedón mólico mayor a 40 cm de profundidad, un alto contenido de COS ( $\geq 0.6$  %), densidad aparente baja ( $< 1 \text{ g cm}^{-3}$ ) y color con croma  $\geq 3$ . La estructura es de agregados granulares y subangulares, que de acuerdo con Six y Pausian (2014) les da un carácter biogénico. La formación de estos epipedones mólicos se debe a la dinámica de la ladera cóncava que permite la acumulación de humus dándole mayor peso a los procesos geomórficos sobre la pedogénesis (Krasilnikov *et al.*, 2005). Esta acumulación de humus es propia del proceso de humificación que es dominante en los tres suelos donde, además, la meteorización del material parental de lutitas y calizas proporcionan un gran contenido de bases intercambiables, principalmente Ca (Bockheim y Gennadiyev, 2000; Mendoza-Vega *et al.*, 2001) que favorece a la formación de complejos órgano-minerales que estabilizan el carbono orgánico (Oades, 1988; Muneer y Oades, 1989; Sutton y Sposito, 2006).

En los horizontes subsuperficiales se presentan procesos edafogénéticos de neoformación e incipiente traslocación de arcillas que se acumulan en los poros del suelo, recubriendo menos del 5% de los agregados observados en las láminas delgadas (Anexo 2: Figura 12, 15 y 38). Además, el desarrollo de estructura, cambio en color y contenido de arcillas con respecto a los horizontes subyacentes es evidencia de un proceso inicial de edafogénesis que se expresa en los horizontes cámbicos (IUSS, Working Group, 2015) que puede derivar en suelos mayormente desarrollados (Bockheim, 2014). La presencia de estos horizontes cámbicos también son el resultado de procesos de ladera debido al cambio textural que hay entre los horizontes superficiales y subsuperficiales (Tabla 2) y de una meteorización del material parental de caliza y lutitas que controlan el contenido de Ca y la saturación de bases dentro de cada suelo (Krasilnikov *et al.*, 2016; Kowalska *et al.*, 2019).

A diferencia de los suelos descritos en BMM de Oaxaca y otros sitios con material parental pobre en bases (Krasilnikov *et al.*, 2005; Álvarez-Arteaga *et al.*, 2008), los suelos sobre material parental rico en bases intercambiables, principalmente Ca y Mg, y en la parte medía de la ladera cóncava se desarrollan en horizontes mólicos y cámbicos, clasificando los suelos del pastizal

y el acahual como Phaeozems. Sin embargo, en el suelo del bosque el lavado de bases es mayor en los horizontes subsecuentes por lo que el suelo del bosque se clasificó como Umbrisol.

La presencia de Phaeozems coincide con los suelos registrados en BMM de Chiapas donde el material parental también es rico en bases y la calidad del COS está determinada por el clima, la vegetación y los procesos geomorfológicos (Mendoza-Vega *et al.*, 2001), que previene la descomposición rápida de las sustancias húmicas, que se polimerizan muy lentamente y permanecen en forma de ácidos fúlvicos (Wang *et al.*, 1980; Mouceni, 1981 en Duchafour, 1984). No obstante, es importante resaltar las propiedades particulares de cada suelo.

#### **5.1.1.1 Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic)- Pastizal**

El contenido de carbono orgánico (CO) del suelo en el Pastizal es de  $73.7 \pm 1.8$  g kg<sup>-1</sup> en el horizonte Ap1 y  $39.1 \pm 0.7$  g kg<sup>-1</sup> en el horizonte Ap2. El pH va de ácido a ligeramente ácido, con una textura arcillosa en los primeros dos horizontes (Tabla 1). Estos resultados son congruentes con el alto potencial de secuestro de C, debido a la alta densidad de raíces con potencial alto para ser estabilizadas en el suelo (Rasse *et al.*, 2005). Sin embargo, la mayoría de la MO permanece como i-MOP (Figura 13) que se incorpora en los agregados del suelo protegiéndola de la descomposición microbiana (Parton *et al.*, 1987).

El contenido de N en el horizonte superficial está ligado a los procesos de fijación de nitrógeno en los pastizales, que posteriormente se empieza a degradar y formar parte del epipedón (An *et al.*, 2010), lo cual también se ve reflejado en la relación C: N. Sin embargo, en el horizonte Ap2 el contenido de N disminuye y en consecuencia la relación C: N aumenta. Esto puede deberse al bajo contenido de N en la vegetación primaria de BMM, ya que presentan hojas con parénquimas y cutículas ricas en alcaloides, compuestos fenólicos y ligninas tal como lo reporta Dietz y Hortung (1995). Los anteriores compuestos inhiben la actividad microbiana en el suelo, y por ende el contenido de N en el suelo disminuye (Velázquez-Rosas, 2011). Ambos horizontes tienen una clase textural arcillosa por lo que se les asignó el calificador *Epiclayic*. El alto contenido de arcilla (>60%) se le atribuye una mayor estabilización de CO (Lützwow *et al.*, 2006).

El incremento de arcillas en los horizontes Bw1 y Bw2 y las evidencias de ligeros

recubrimientos mediante su estudio micromorfológico (Anexo 2, Figura 10 y 14), detonan en la pedogénesis del horizonte Cámbico. También se describió un ligero patrón stágnico en campo (Tabla 1); sin embargo, en las láminas delgadas los rasgos redoximórficos se presentan en bajos porcentajes y no cumplen con el calificador stágnico pero son indicadores de condiciones de saturación de agua y anaerobiosis de bajo hidromorfismo (Veneman, *et al.*, 1976).

La saturación de bases intercambiables es ligeramente mayor a 50 %, donde Ca y Mg son los iones dominantes, pero el lavado de estas es evidente. Bajo condiciones mayores de percolación y materia orgánica está acidificando al suelo, de ahí que el pH del suelo se encuentra entre moderadamente ácido (> 5.50) a ligeramente ácido (<6.33), por lo que se evidencia el proceso de lixiviación moderada, relacionado con el grado de evolución del suelo (Montagne *et al.*, 2009).

#### **5.1.1.2 Cambic Phaeozem (Epiclayic, Endoloamic, Hyperhumic)-Acahual**

En el suelo del Acahual el contenido de CO es de  $117.85 \pm 7.01 \text{ g kg}^{-1}$  en el horizonte Ah1 y de  $37.24 \pm 1.7 \text{ g kg}^{-1}$  en horizonte Ah2 y el pH del suelo es ligeramente ácido. Estas características de los dos primeros horizontes genéticos cumplen con el criterio de un horizonte mólico e incluso se considera *Hyperhumic*, debido a que su contenido de CO es > 6% (WRB, 2015). El alto contenido de CO se debe a la tasa de descomposición lenta del mantillo en condiciones ambientales de alta precipitación y humedad relativa (Vitousek y Sanford, 1986). El sitio está representado por una vegetación secundaria y las propiedades del suelo muestran un alto contenido de CO que se asemeja al reportado en trabajos anteriores en la Sierra Norte de Oaxaca (Bautista-Cruz y del Castillo 2005; Álvarez-Arteaga *et al.*, 2012). Estos suelos presentan un alto contenido de arcilla (65 y 63.2 % respectivamente), por lo que se le asignó el calificador *Epiclayic*, que favorece a la formación componentes órgano-minerales que repercuten en procesos de la estabilización de CO (Lützow *et al.*, 2006).

En los horizontes subsuperficiales ABw y Bw se observa un incremento de arcillas con respecto al horizonte inferior debido a neoformación de arcillas en estos horizontes. Además, en las láminas delgadas se observan algunos recubrimientos de arcilla en el horizonte Bw (Anexo 2, Figura 33) lo cual nos denota un horizonte cámbico. La presencia de este horizonte cámbico ha sido reportada en suelos que se encuentran en la parte baja de los BMM de la Sierra Norte



Oaxaca (Álvarez-Arteaga *et al.*, 2008) y en suelos que derivan de material parental calcáreo (Mendoza-Vega *et al.*, 2001). En el horizonte Bw se observan concreciones de manganeso en campo (Tabla 1) y algunas trazas en las láminas delgadas (Anexo 2, Figura 35) que denotan la saturación de humedad que existe en el endopedón durante ciertos periodos, que favorecen a la anaerobiosis y por lo tanto a la formación de concreciones de manganeso (Dorransoro *et al.*, 1988). La saturación de bases intercambiables en el suelo es menor con respecto al Cambic Phaeozem del pastizal; sin embargo, sigue siendo mayor a 50 %, donde Ca y Mg fueron los iones dominantes y el pH del suelo se encuentra de neutro a moderadamente ácido (6.85-5.98), por lo que al comparar su evolución con otros suelos de BMM se puede indicar que ha sido moderada.

#### ***5.1.1.3 Follic Cambic Mollic Umbrisol (Clayic, Hyperhumic)- Bosque***

En el suelo con mayor cobertura de especies forestales del BMM, el contenido de CO en promedio es de  $134.63 \pm 5.5 \text{ g kg}^{-1}$  en el horizonte Ah y  $117.76 \pm 4.5 \text{ g kg}^{-1}$  en el horizonte 2Ah, con un pH ligeramente ácido en los primeros dos horizontes y aumento gradual con la profundidad a ligeramente alcalino, debido a la influencia del intemperismo de rocas calizas del material parental. En este suelo el factor micro relieve (con inclinación del 90% para el sitio) juega un papel importante en la génesis, ya que la deposición de rocas y los deslizamientos de tierra rejuvenecen la superficie estos suelos por lo cual hay una gran variedad espacial de suelos (Krasilnikov *et al.*, 2016; García-Pausas *et al.*, 2017). Es evidente la acumulación de CO en todos los horizontes (Tabla 1) debido a la lenta mineralización característica de los suelos en BBM (Vitousek y Sanford, 1986; Álvarez-Arteaga *et al.*, 2012).

Otra propiedad importante para este suelo es el tipo de estructura que desarrolla en el horizonte Ah la cual está formada por agregados subangulares que rompen a microagregados granulares y coincide con la densidad aparente de  $0.61 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Además, el suelo presenta una gran cantidad de materia orgánica particulada (i-MOP). Estas propiedades hacen que el horizonte sea de materiales nuevos y un horizonte de transición entre el horizonte fólico y el horizonte móllico que influye en la morfología de su estructura en agregados granulares y el contenido de i-MOP (Zanella *et al.*, 2011).

En los horizontes 2AB y 2Bw, la evolución de la estructura a bloques angulares medios (Tabla 1) y cambio en el color a pardo denotan la disminución de CO, con respecto a los horizontes superiores que evidencian un cambio edafogenético que se le atribuye al intemperismo *in situ* de un horizonte cámbico (WRB, 2015). La saturación de bases intercambiables en el suelo es menor con respecto a los Cambic Phaeozems del pastizal y del acahual, ya que el promedio ponderado es menor a 50% en todo el suelo, por lo cual se clasificó como Umbrisol. En este suelo el factor microrrelieve es importante debido a que el depósito de materiales nuevos hace que el suelo se rejuvenezca y se depositen nuevos materiales orgánicos convergiendo en procesos edafogenéticos en Umbrisols. Además, se ha visto que la presencia de materiales ricos en bases como las calizas conduce a la formación de Umbrisols con un horizonte profundo y rico en humus (Mendoza-Vega *et al.*, 2001).

### **5.1.2 La estabilidad de los macro, meso y microagregados y arreglo estructural de los epipedones mólicos**

De acuerdo con los resultados no se encontraron diferencias significativas en la estabilidad de los macro, meso y microagregados entre cada uno de los sitios, debido a la similitud de los procesos en los tres suelos que favorecen a la formación del epipedón mólico con propiedades y procesos de humificación, estabilización y acumulación del CO. De acuerdo con Six *et al.* (2000) existe un orden jerárquico de agregados en el suelo en donde la MOS es el principal agente cohesivo y la materia orgánica particulada (MOP) derivada de las raíces. La MOP juega un papel importante en la dinámica de agregación, como se observa en los tres suelos, en donde la i-MOP y las macromoléculas coloidales de las sustancias húmicas son dominantes en los agregados (Tabla 3). Dada la alta concentración del ion  $Ca^{2+}$  en el complejo de cambio de los tres epipedones mólicos, es muy probable que favorezca en la agregación tanto de los macro, meso y microagregados. Baldock *et al.* (1994) indican que el calcio ejerce su influencia en la complejación coloidal órgano-mineral, más evidente en los microagregados debido a los enlaces con los sitios de intercambio generados por la materia orgánica y también puede aumentar indirectamente la agregación de los macroagregados a través de la estimulación de la actividad microbiana en suelos ligeramente ácidos (Chan y Heenan, 1999).

En el epipedón mólico del pastizal (Anexo 2, Figura 1), los horizontes Ap1 y Ap2 muestran raíces bien preservadas las cuales se distribuyen dentro de los macroagregados, además de fracciones de carbón vegetal en los meso y microagregados (Anexo 2, Figura 3). Las raíces de los pastizales pueden favorecer a la estabilidad de los agregados, debido a la producción de mucílagos por la gran abundancia de microorganismos asociada dentro de la rizosfera, raíces finas e hifas fúngicas (Tisdall y Oades, 1982; Haynes y Swift, 1990). Asimismo, la descomposición *in situ* de esta materia orgánica particulada (i-MOP) genera materiales orgánicos finos amorfos indicadores de los procesos de humificación de la MO observados dentro de los agregados con frecuencia en 8%. La mayor fracción de MO humificada se encuentra como  $C_{AFs}$  (Tabla 4), los cuales tienen una alta capacidad de formar uniones órgano-minerales, por su mayor número de grupos funcionales activos, en comparación con la fracción de  $C_{AHs}$  (Kulikowska *et al.*, 2015).

En el caso del epipedón mólico del Cambic Phaeozem del acahual, los horizontes Ah1 y Ah2 presentan un alto contenido de raíces bien preservadas, que también se encuentran dentro de los macroagregados y mesoagregados en conjunto con la presencia de amorfos de CO. El vínculo entre estas dos fracciones se rige por mecanismos de estabilización debido a la protección física de cohesión y adhesión e inaccesibilidad microbiana a la i-MOP y la consecuente protección química adquirida durante el proceso de humificación (Lützow *et al.*, 2006; Six *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2017). Además, el alto contenido de arcillas en este horizonte favorece a la formación de complejos órgano-minerales y quelatos de calcio que son controladores importantes en la estabilidad estructural (Six *et al.*, 2000).

En el epipedón del Mollic Umbrisol del bosque se sugiere que los agregados granulares mantienen su estabilidad debido a la humificación de los componentes orgánicos derivados de la vegetación primaria del BMM. Estos componentes orgánicos en el sitio podrían ser recalcitrantes debido a las altas relaciones de C: N que hay en el epipedón y por ende tener una alta persistencia la cual mantiene fuertemente estables a los agregados (Tisdall y Oades, 1982) vinculados al mayor contenido de i-MOP en este suelo, con relación a los otros.

En las láminas delgadas se observó alto grado de preservación (Anexo 2, Figura 42), esto se atribuye a que la vegetación de los BMM asigna una gran proporción de energía en la

producción de raíces finas de biomasa para la captura de nutrientes en condiciones de suelo más adversas (Leuschner *et al.*, 2007).

También se observaron amorfos comunes de CO humificado que corresponde la mayor proporción a los ácidos fúlvicos e incluso su contenido es mayor que en los otros suelos (Figura 14), atribuyendo su participación en la dinámica de la estabilidad de los agregados.

### **5.1.3 Relación entre la estabilidad de los agregados del suelo con la i-MOP y los coloides del suelo.**

Los tres suelos presentan una alta estabilidad de macroagregados (>250  $\mu\text{m}$ ) y es en el bosque donde el contenido de i-MOP es mayor (Figura 13). En el horizonte Ah y 2Ah el contenido de arcillas es alto (>38%), por lo que podría decirse que fomenta a la agregación al formar complejos órgano-minerales que favorecen la estabilización del C humificado y la i-MOP puede volverse más dominante con el aumento de la arcilla, como se ha visto en otros suelos (Schweizer *et al.*, 2021). Lo anterior también puede ser corroborado por la descripción de la lámina delgada (Anexo 2, figura 39) en donde la i-MOP en el bosque se encuentra dentro de los agregados con un grado de preservación alto. Además, el grado de desarrollo de los macroagregados (>250  $\mu\text{m}$ ) es fuerte, por lo que les da una mayor estabilidad.

A nivel micromorfológico, los macroagregados del acahual están conformados por microagregados granulares (Anexo 2, Figura 22). Esto comprueba la teoría jerárquica propuesta por Tisdall y Oades (1982) en donde los macroagregados están conformados por un conjunto de microagregados. Los agregados están unidos debido al alto contenido de sustancias húmicas en particular del  $C_{AF}$  y de las huminas resultado de la edafogénesis como formas recalcitrantes entre la unión de las SH y los coloides minerales a partir de grupos fenólicos y carboxílicos que tienen en su conformación (Pollákoká *et al.*, 2018). Las relaciones  $C_{AH}: C_{AF}$  fueron <1, lo que indica que hay una dominancia de AF ante los AH. Sin embargo, subyace que buena parte de las sustancias húmicas se encuentra como huminas. La presencia y recalcitrancia de estos AF en donde las cadenas alifáticas predominan sobre los núcleos aromáticos (Duchaufour, 1984), puede deberse al contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  que provoca una insolubilización de los precursores de la humificación, que precipitan inmediatamente en las arcillas saturadas de  $\text{Ca}^{2+}$ , pero que se polimerizan muy lentamente y permanecen en forma de ácidos fúlvicos (Wang *et al.*, 1980

Mucawi, 1981 en Duchaufour. 1984).

En los macroagregados de estructura granular y subangular del pastizal las principales causantes de la agregación son las raíces debido a su abundancia entre los macroagregados (Anexo 2, Figuras 1 y 5). La rizosfera es donde ocurre la producción de mucílagos que promueve la agregación y a largo plazo favorece la neoformación y acumulación de sustancias húmicas en el suelo para estabilizar los agregados (Haynes y Swift, 1990; Tisdall y Oades, 1982).

## 5.2 Conclusiones

Los suelos que se describieron en la cuenca de Ojo de Agua San Francisco, Jalpan en un bosque mesófilo de montaña se clasificaron como Cambic Phaeozem (*Epiclayic, Endoloamic*) en el pastizal, Cambic Phaeozem (*Epiclayic, Endoloamic, Hyperhumic*) en el acahual y Folic Cambic Mollic Umbrisol (*Clayic, Hyperhumic*). Los tres suelos tienen horizontes de acumulación de materia orgánica (hasta de 40 cm) y se expresan principalmente como un horizonte móllico, aunque la disminución de la saturación de bases permite la formación de un epipedón úmbirco. Los principales procesos edafogénicos asociados con la estabilidad de agregados son la humificación y como resultado la estabilización del CO. La proporción de la i-MOP es microagregados > mesoagregados > macroagregados y la fracción del CAF fue la dominante en las sustancias húmicas.

En el Cambic Phaeozem (*Epiclayic, Endoloamic*) del pastizal, la estabilidad de los macroagregados está relacionada con la i-MOP, el contenido de arcilla y las sustancias húmicas, debido a las interacciones rizosféricas que liberan tanto agentes temporales y transitorios que participan en la dinámica de la agregación favorecen a la humificación a largo plazo.

En el *Cambic Phaeozem* (*Epiclayic, Endoloamic, Hyperhumic*) del acahual, se comprueba la convergencia de la teoría jerárquica de la agregación donde la unión con macromoléculas flexibles del  $C_{AFs}$  de los macroagregados conformados por microagregados posiblemente unidos por los grupos funcionales de los AF.

En el Folic Cambic Mollic Umbrisol (*Clayic, Hyperhumic*) el alto contenido de arcillas favorece a la agregación debido a la formación de complejos órgano-minerales, siendo los ácidos fúlvicos mayoritarios. También participan las huminas, los ácidos húmicos y la i-MOP que se mantiene

protegida por los agregados y por su recalcitrancia química, debido a los componentes orgánicos de la vegetación de los bosques mesófilos de montaña. Además, la edafogénesis diferenciada se asocia con la dinámica de los procesos de ladera.

La alta estabilidad de los agregados de los tres epipedones móllicos se relaciona con la protección física de iMOP, el almacén de COS en ácidos fúlvicos que, en conjunto con el alto contenido de arcillas, favorecen a su estabilización.

## ANEXO I

**A1.1 Cuadro 1. Descripción morfológica del perfil del pastizal.**

Hori- zonte	Prof. (cm)	Descripción
Ap1	0-10/11	Móllico. Color pardo grisáceo muy oscuro en seco (10YR 3/2) y pardo muy oscuro en húmedo (10 YR 2/2); textura franco arcillosa; estructura granular fina a muy fina, moderadamente desarrollados, muy friable (húmedo) y ligeramente adhesivo y plástico (saturado); raíces medias pocas; poros <i>inped</i> muy finos abundantes y vesículas finas pocas; reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> fuerte, fuertemente ácido (pH 5.5 en agua); límite ondulado difuso.
Ap2	10/11– 35/41	Móllico. Color pardo en seco (10YR 4/3) y pardo oscuro en húmedo (10YR 3/3); textura franco arcillosa; estructura subangular gruesa dominante con agregados granulares angulares finos, fuertemente desarrollados, muy firme (húmedo) y muy adhesivo y plástico (saturado); raíces medias de moderadas a pocas; poros vesiculares intersticiales muy finos abundantes; reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> fuerte, fuertemente ácido (pH 5.63 en agua); límite ondulado y claro.
Bw	35/41- 51/65	Cámbico. Color amarillo pardusco en seco (10YR 6/6) y pardo amarillento oscuro en húmedo (10YR 3/6); textura franco arcillosa; estructura en bloques angulares muy gruesos fuertemente desarrollados, friable (húmedo) y adhesivo y muy plástico (saturado); raíces finas medias; poros intersticiales finos pocos; reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> baja, moderadamente ácido (pH 6.02 en agua); límite ondulado y difuso.
Bwg2	51/65- 104/116	Cámbico. Color amarillo pardusco en seco (10YR 6/6) y pardo en húmedo (10YR 4/6); textura franca; estructura en bloques angulares gruesos, moderadamente desarrollados, friable (húmedo) y no adhesivo y muy plástico (saturado); revestimientos color pardo olivo (2.5 Y 5/4) y gris verdusco (Gley 1 6/10 Y), con concreciones de manganeso; poros intersticiales finos comunes; reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> baja, moderadamente ácido (pH 6.27 en agua); límite ondulado.
Cg	104/116 -120	Color pardo amarillento claro en seco (10YR 6/4) y pardo amarillento oscuro en húmedo (10YR 3/6); textura franca; masivo, friable (húmedo) y adhesivo y muy plástico (saturado); filamentos de concreciones de manganeso; poros intersticiales muy pocos; reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> baja, ligeramente ácido (pH 6.33 en agua).



## A1.2 Cuadro 2. Descripción morfológicas del perfil del acahual.



Horizonte	Prof. (cm)	Descripción
Ah1	0-10/15	Móllico. Color pardo oscuro en seco (10YR 3/3) y pardo muy oscuro en húmedo (10YR 2/2); textura franca; bloques subangulares medios y migajones finos, moderadamente desarrollados, friable (húmedo), ligeramente adhesivo y plástico (saturado); poros intersticiales y cavidades comunes; reacción a H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> fuerte, ligeramente ácido (pH 6.85 en agua); límite ondulado y claro.
Ah2	10/11–39/42	Móllico. Color pardo amarillento oscuro en seco (10YR 4/4) y pardo oscuro en húmedo (10YR 3/3); textura arcillosa; bloques subangulares muy gruesos y gruesos que rompen en bloques subangulares medios, moderadamente desarrollados, muy firme (húmedo), adhesivo y plástico (saturado); poros intersticiales y cavidades comunes; reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> fuerte, ligeramente ácido (pH 6.46 en agua); límite difuso quebrado.
AB	39/42–69/71	Color amarillo pardusco en seco (10YR 6/6) y pardo amarillento oscuro en húmedo (10YR 4/6); textura franco-arcillosa; bloques angulares y subangulares, moderadamente desarrollados, firme (húmedo) y ligeramente adhesivo y plástico (saturado); poros intersticiales comunes; reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> fuerte, moderadamente ácido (pH 6.36 en agua); límite ondulado y difuso.
Bw	69/71–94	Cámbico. Color amarillo pardusco seco (10YR 6/6) y pardo amarillento en húmedo (10YR 4/6); textura franco arcillosa; bloques angulares muy gruesos, moderadamente desarrollados, friable (húmedo), ligeramente adhesivo y ligeramente plástico (saturado); poros intersticiales muy pocos; reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> fuerte, moderadamente ácido (pH 5.98 en agua).
CB	94-130	Color amarillo pardusco en seco (10YR 6/6) y pardo amarillento en húmedo (10YR 4/6); textura franco arcillo limosa; bloques angulares muy gruesos, fuertemente desarrollados, friable (húmedo), no adhesivo y no plástico (saturado); reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> baja, moderadamente ácido (pH 6.04 en agua).



### A1.3 Cuadro 3. Descripción morfológica del perfil del bosque.



Horizonte	Prof. (cm)	Descripción
Ah	0-4/7	Móllico. Color pardo oscuro en seco (7.5YR 3/2) y pardo muy oscuro en húmedo (5YR 2/2); textura franco arcillosa; bloques subangulares que rompe a granulares de tamaño grande, fuertemente desarrollados; raíces finas comunes; poros <i>exped</i> intersticiales micro comunes; reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> fuerte, ligeramente ácido (pH 6.66 en agua); límite quebrado y abrupto.
2Ah	4/7-37/43	Móllico. Color pardo grisáceo muy oscuro en seco (10YR 3/2) y pardo muy oscuro en húmedo (10YR 2/2); textura franco arcillo limoso; estructura granular grande y media, fuertemente desarrollada; raíces gruesas abundantes y finas comunes; poros <i>exped</i> cavidades muy finos abundantes; reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> fuerte, reacción al HCl baja, ligeramente ácido (6.91 en agua); límite difuso quebrado.
2AB	37/43-52/54	Móllico. Color pardo grisáceo muy oscuro en seco (10YR 3/2) y negro en húmedo (10YR 2/1); textura franco arcillosa; bloques angulares grandes que rompen a bloques subangulares gruesos y finos, fuertemente desarrollados; raíces gruesas abundantes y finas pocas; poros intersticiales finos pocos; reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> fuerte, reacción al HCl baja, ligeramente básico (pH 7.26 en agua); límite ondulado y difuso.
2BC	52/54-65/90	Cámbico. Color pardo grisáceo muy oscuro en seco (10YR 3/2) y pardo muy oscuro en húmedo (10YR 2/2); textura franco limosa; bloques angulares medios, moderadamente desarrollados; raíces finas comunes; poros cavidad finos pocos; reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> baja, reacción al HCl baja, ligeramente básico (pH 7.27 en agua).
R		Roca caliza.

## ANEXO II

### A2.0 Descripción micromorfológica del horizonte Ap1 del Phaeozem del pastizal

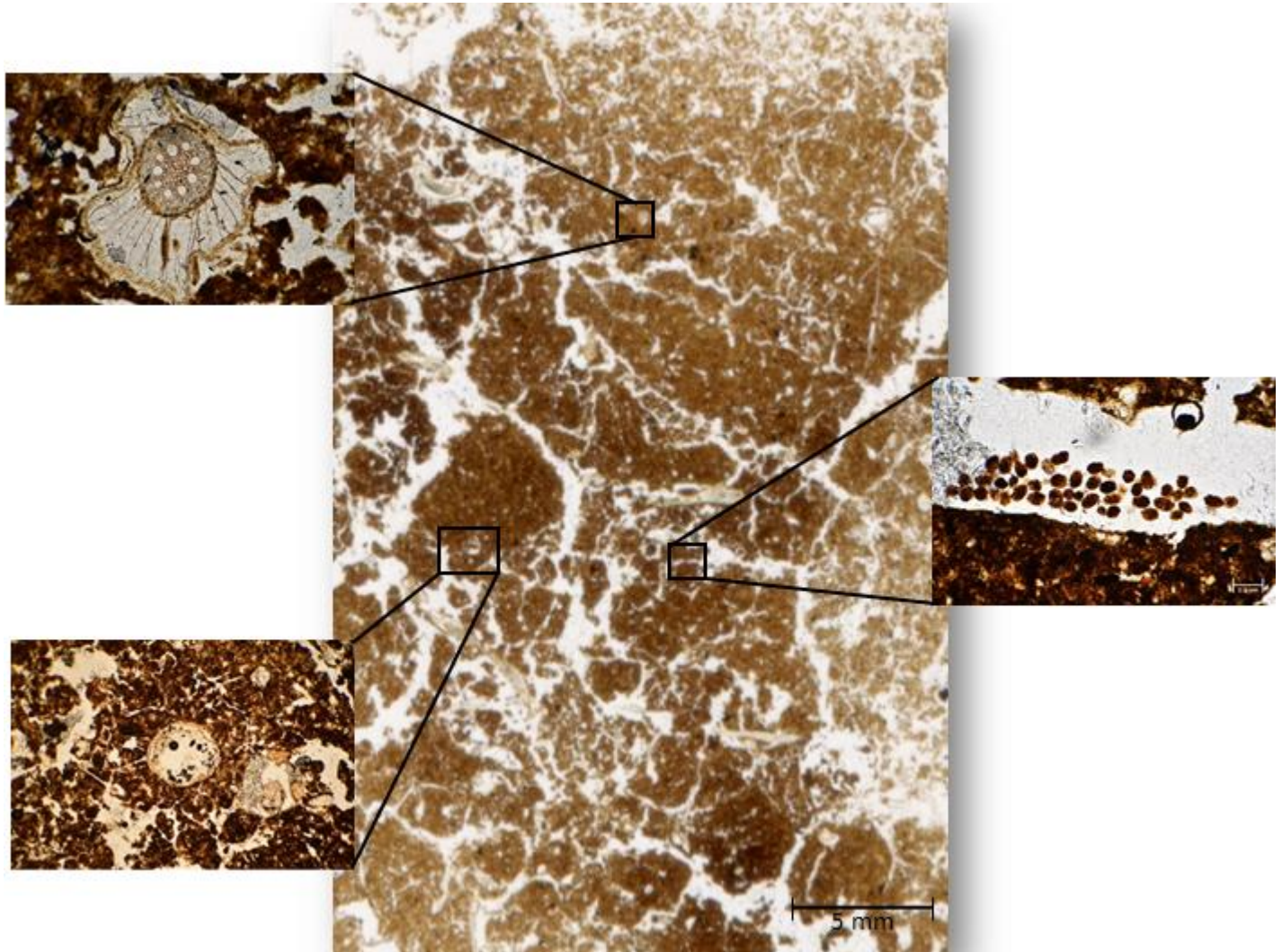


Figura 1. Sección delgada del horizonte Ap1 del Phaeozem en el pastizal.

#### **Microestructura**

Pedal 100% biogénica.

Estructura en bloques subangulares, migajosa y granular.

## Agregados

Agregados granulares fuertemente desarrollados, de forma subredondeada con superficie ondulada de tamaño arenas medias (500-200  $\mu\text{m}$ ) y frecuencia del 15%; con una distribución relacionada enáulica.

Agregados migajosos moderadamente desarrollados, de superficie rugosa de tamaño arenas medias (500-200  $\mu\text{m}$ ) de frecuencia del 60% y de tamaño arenas finas (200-50  $\mu\text{m}$ ) de frecuencia del 8%, con una distribución relacionada enáulica de agregados con microagregados.

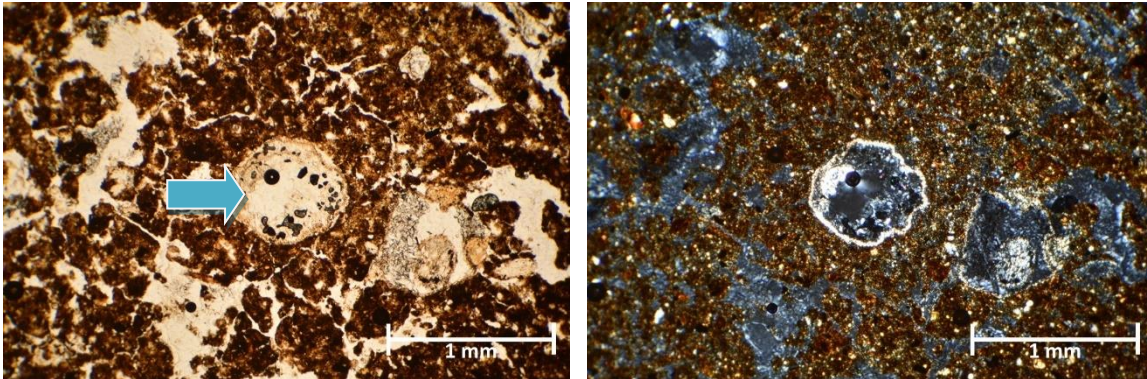


Figura 2. Agregados granulares fuertemente desarrollados y pequeños residuos carbonizados (fecha azul). Izquierda en luz plana (LPP) y derecha en luz polarizada plana (LPC).

## Porosidad

- a) Poros inter-agregados: Poros de empaquetamiento compuesto de  $\sim 10 \mu\text{m}$  con una frecuencia del 15 % con poros canal de  $\sim 20\text{-}10 \mu\text{m}$  de grosor con una frecuencia del 3% y arreglo aleatorio.
- b) Poros intra-agregados: Poros cavidad de  $<10 \mu\text{m}$  con una frecuencia del 3% dentro de los agregados de formas redondeadas y regulares.

### A2.0.1 Componentes básicos orgánicos

#### Límite g/f 10 $\mu\text{m}$

##### A2.0.1.1 Fracción gruesa

La fracción gruesa está dominada por residuos de raíces, poco descompuestas por su alta birrefringencia y donde su desmenuzamiento es bajo ( $<2\%$ ). En la Figura 3 se muestra una raíz de 1 mm de diámetro, y su cilindro vascular en el centro de 0.4 mm; bien preservada (98%) debido a que muestra alta birrefringencia en todo el tejido; muestra colores pardos claro y opaco en LPP y birrefringente con colores blancos de primer orden en LPC. También se identificó el tejido parenquimático de células alargadas con grado de desmenuzamiento de 40% y de preservación de

60%; muestra birrefringencia en la pared celular. El tejido lignificado es de grosor de 10  $\mu\text{m}$ , bajo grado de desmenuzamiento de 2% y preservación de 98% debido a una alta birrefringencia en todo el tejido; color pardo claro.

En la Figura 2 se observan pequeños residuos carbonizados en el centro del contorno de tamaño  $<12 \mu\text{m}$ , de color negro y opacos, sin birrefringencia ni estructura interna.

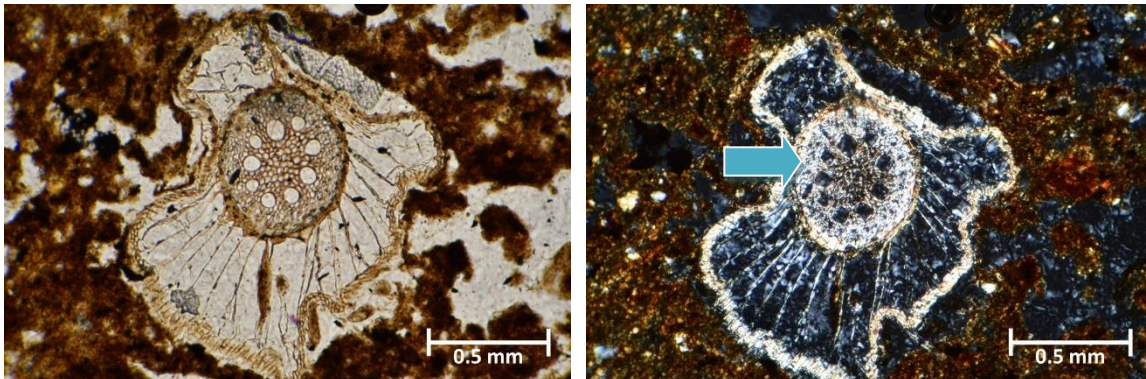


Figura 3. Residuo de raíz, ligeramente descompuesta pues se aprecian todos sus tejidos y alta birrefringencia en LPC (flecha azul). Izquierda en LPP y derecha en LPC.

#### **A2.0.1.2 Material fino amorfo**

Material amorfo de superficie rugosa, color opaco y frecuencia de 8% que se encuentran dentro de los agregados. También se observan pigmentos orgánicos dentro de los agregados de tamaño 20  $\mu\text{m}$  de color pardo opaco y frecuencia de 5%.

#### **A2.0.2 Componentes básicos minerales**

##### **A2.0.2.1 Granos minerales simples**

Granos de forma redondeada anhedral; de tamaño arenas finas ( $< 100 \mu\text{m}$ ), moderadamente ordenado con distribución aleatoria.

##### **A2.0.2.2 Masa basal**

Fábrica-b moteada, pobremente ordenados, con patrones de distribución relacionada compleja g/f porfídica de grano simple dentro de los agregados.

#### **A2.0.3 Rasgos pedológicos**

##### **A2.0.3.1 Excrementos**

Excrementos de forma elipsoidal de ácaros oribátidos con superficie moderadamente rugosa y de tamaño moderadamente delgado (180 x 100  $\mu\text{m}$ ). Tienen frecuencia de 25%, son de color pardo oscuro y pardo. Su patrón de distribución básica es agrupado y su distribución relacionada es mónica.

#### **A2.0.3.2 Rellenos**

Relleno discontinuo del poro canal que consiste en excrementos en grupo.

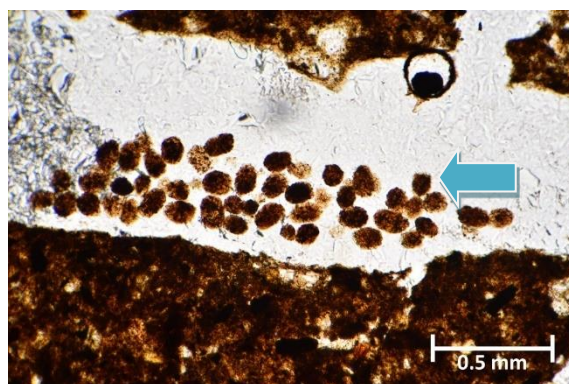


Figura 4. Excrementos en un poro en LPP.

## A2.1 Descripción micromorfológica del horizonte Ap2 del Phaeozem del pastizal

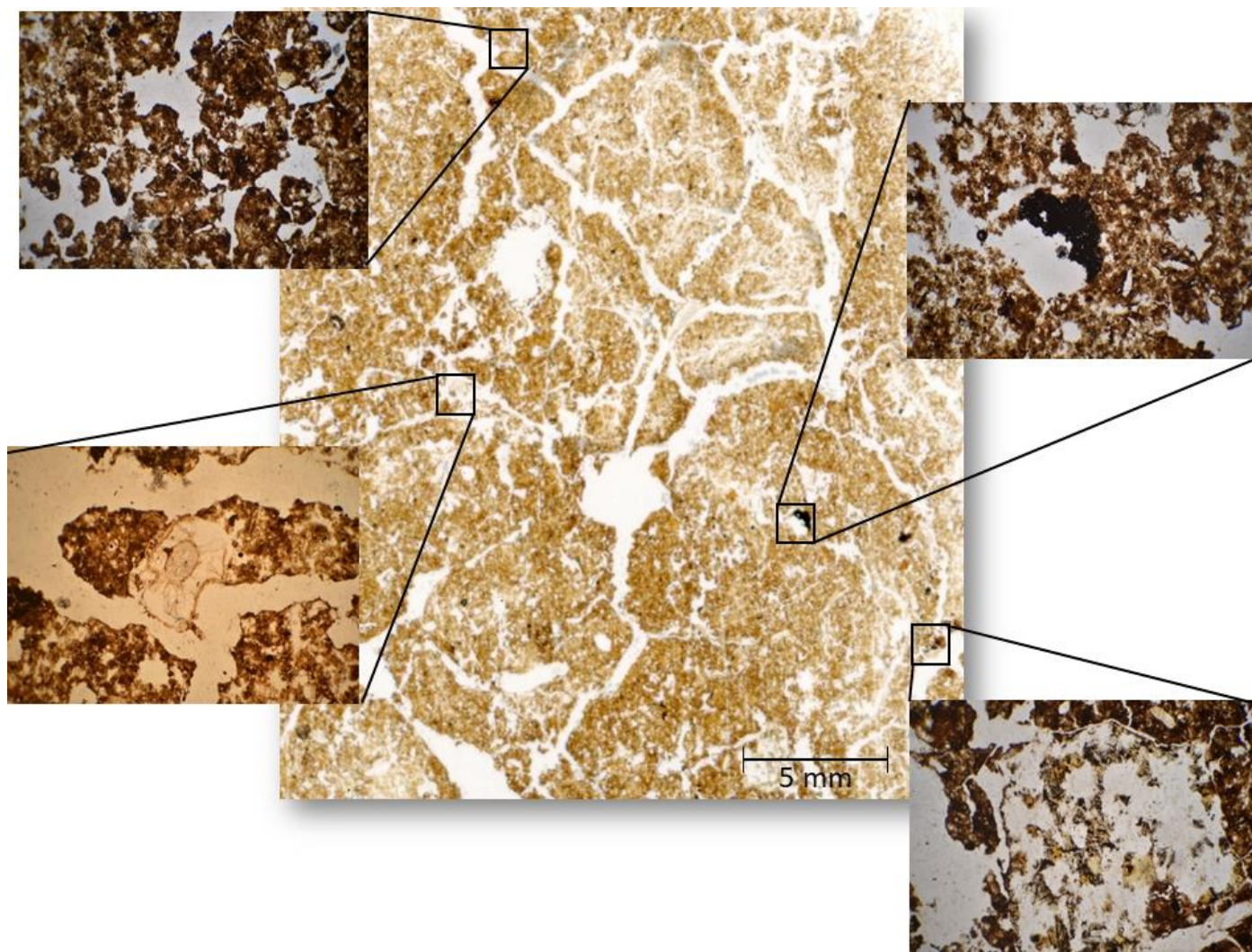


Figura 5. Sección delgada del horizonte Ap2 del Phaeozem en el pastizal.

### A2.1.1 Microestructura

Pedal biogénica y fisicogénica por la presencia de bloques subangulares.  
Estructura compleja de agregados granulares y subangulares.

### A2.1.1.1 Agregados

Agregados granulares fuertemente desarrollados, de forma sub-redondeada con superficie plana de tamaño arenas finas ( $<200 \mu\text{m}$ ) y frecuencia de 10%; con una distribución relacionada enáulica.

Agregados subangulares de moderado a fuertemente desarrollados, de forma sub-redondeada con superficie plana de tamaño arenas medias ( $<500 \mu\text{m}$ ) y frecuencia de 40% con distribución relacionada enáulica.

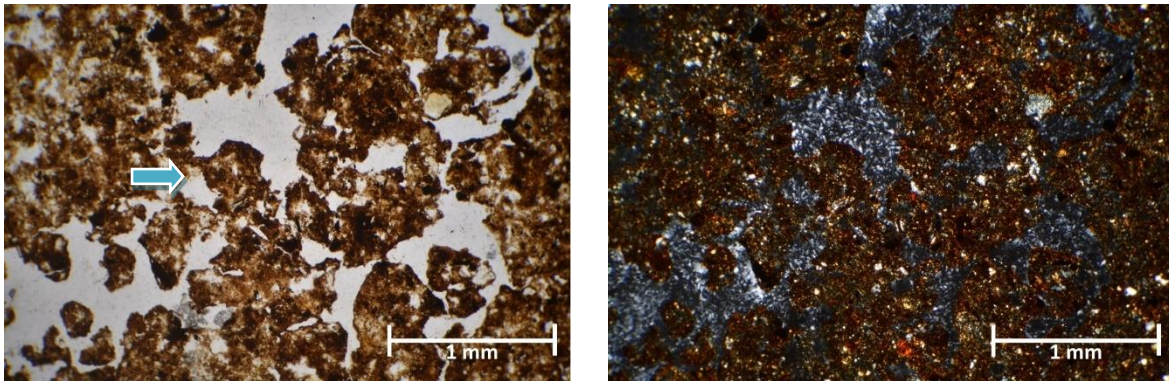


Figura 6. Agregados subangulares de moderado desarrollo con material fino amorfo globular dentro de los agregados (flecha azul). Izquierda en LPP y derecha en LPC.

### A2.1.1.2 Porosidad

Poros inter-agregados de empaquetamiento compuesto de tamaño que van desde arenas medias ( $<500 \mu\text{m}$ ) a arenas finas ( $<200 \mu\text{m}$ ) y una frecuencia de 45% de caras lisas/subredondeadas. Su patrón de distribución básica es aleatorio y su orientación referida no relacionada.

Poros cavidad intra-agregados de tamaño limos finos ( $<50 \mu\text{m}$ ) con frecuencia de 5% de caras lisas/redondeadas. Su patrón de distribución básica es aleatorio y su orientación referida no relacionada.

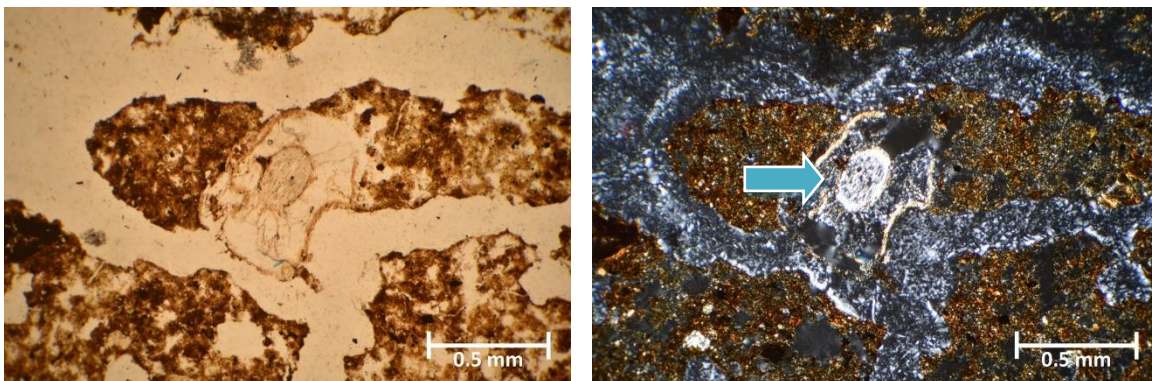


Figura 7. Material orgánico grueso con alta birrefringencia en el centro (flecha azul) y una fábrica b-moteada. Izquierda LPP y derecha LPC.

## A2.1.2 Componentes básicos orgánicos

### A2.1.2.1 Fracción gruesa

Raíces de 0.5 mm en donde se observa su cilindro vascular de 0.2 mm con bajo grado de desmenuzamiento (10%) y preservación de 80 % debido a la alta birrefringencia en la mayoría del tejido; es de color pardo claro, opaco en LPP y birrefringente en LPC en el centro. Se observa su tejido lignificado de un grosor de 10  $\mu\text{m}$ , color pardo claro, no opaco con luz polarizada cruzada, desmenuzamiento del 10% y de preservación del 90%.

También se observan pequeños carbones de tamaño 500  $\mu\text{m}$ , de color negro y opacos, sin birrefringencia ni estructura interna (Figura 9).

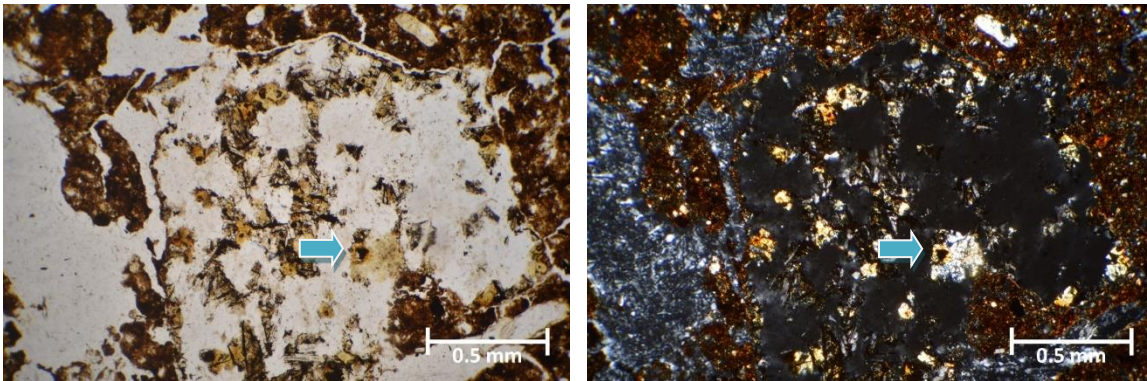


Figura 8. Grano mineral anhedral (flechas azules). Izquierda LPP y derecha LPC.

### A2.1.2.2 Material Fino Amorfo

Material fino amorfo globular con frecuencia de 10 % (Figura 6), que se encuentra dentro de los agregados subangulares.

## A2.1.3 Componentes básicos minerales

### A2.1.3.1 Granos minerales simple

Granos anhedrales lisos/subredondeados de hábito tubular y blocosa de tamaños de arenas finas (<200  $\mu\text{m}$ ) y limos (<50  $\mu\text{m}$ ), frecuencia de 2% y 10% respectivamente.

### A2.1.3.2 Rasgos pedológicos

#### Excrementos

Excrementos de forma elipsoidal de ácaros oribátidos con superficie moderadamente rugosa y de tamaño moderadamente delgado (180 x 100  $\mu\text{m}$ ). Tienen frecuencia de 5%, son de color



pardo oscuro y pardo. Su patrón de distribución básica es agrupado y su distribución relacionada es mónica.

### A2.1.3.3 Rellenos

Relleno discontinuo del poro canal que consiste en excrementos en grupo.

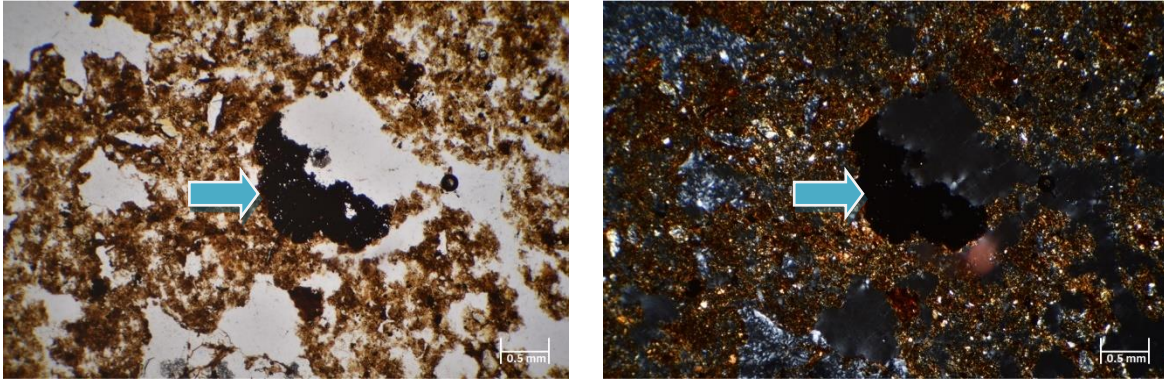


Figura 9. Residuo de material carbonizado. Izquierda LPP y derecha LPC.

## A2.2 Descripción micromorfológica del horizonte 2Bwg1 del Phaeozem del pastizal

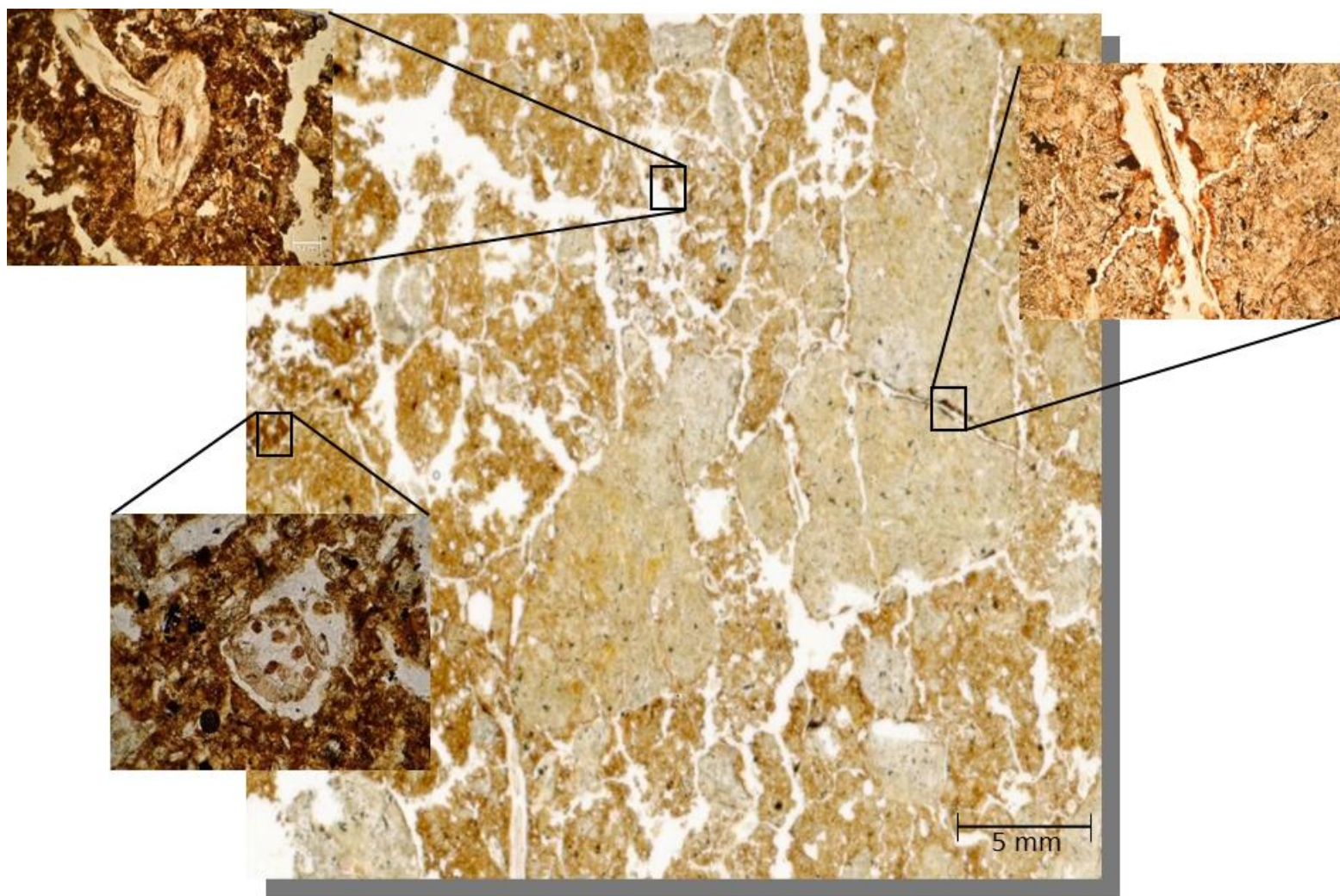


Figura 10. Sección delgada del horizonte 2Bwg1 del Phaeozem en el pastizal.

### A2.2.1 Microestructura

La estructura es pedal 100% de origen biogénico y físicogénico por la presencia de bloques subangulares y fisuras. Es una estructura compleja de agregados angulares y subangulares.

#### A2.2.1.1 Agregados

Estructura de bloques subangulares, fuertemente desarrollados, subredondeados con superficie plana; de tamaño arenas gruesas ( $>500 \mu\text{m}$ ) y medias ( $>200 \mu\text{m}$ ), con frecuencia de 60%, con una distribución relacionada enáulica.

Estructura de bloques subangulares fuertemente desarrollados, de forma redondeada y superficie ondulada de tamaño arenas muy finas ( $<50\ \mu\text{m}$ ), frecuencia de 10% con distribución enáulica de microagregados entre macroagregados.

#### **A2.2.1.2 Porosidad**

Poros inter-agregados de empaquetamiento compuesto de tamaño que van desde arenas medias ( $<500\ \mu\text{m}$ ) a arenas finas ( $<200\ \mu\text{m}$ ) y frecuencia del 20%; caras lisas; patrón de distribución básica aleatoria y orientación referida no relacionada.

Poros fisura inter-agregados en forma recta de tamaño  $\sim 20\ \mu\text{m}$  y frecuencia de 5% de caras lisas; patrón de distribución básica aleatoria y orientación referida no relacionada.

Poros cavidad intra-agregados de tamaño arenas medias ( $<500\ \mu\text{m}$ ) y limos finos ( $<50\ \mu\text{m}$ ); frecuencia de 5% y de caras lisas/redondeadas; patrón de distribución básica aleatoria y orientación referida no relacionada.

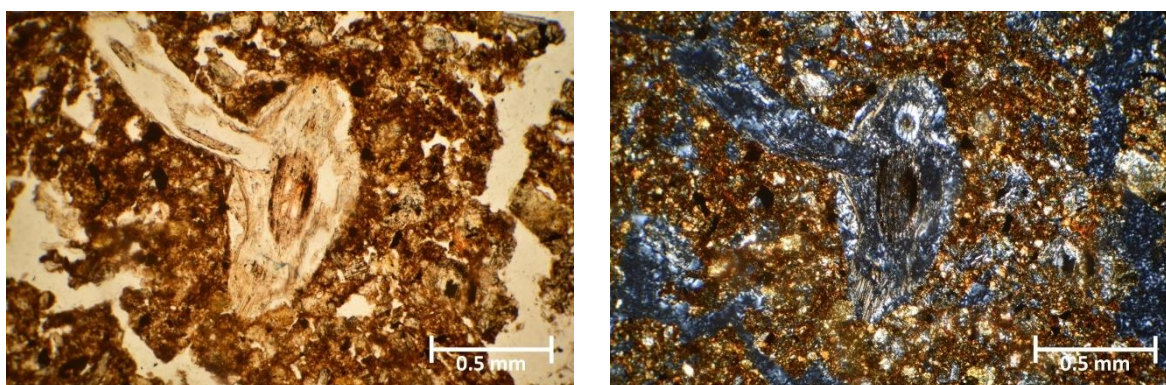


Figura 11. Residuo de raíz, con una fábrica b-moteada. Izquierda LPP y derecha LPC.

#### **A2.2.2 Componentes básicos orgánicos**

##### **A2221 Fracción gruesa**

Raíces de 0.5 mm, en donde se observa su cilindro vascular de 0.1 mm, con grado bajo de desmenuzamiento (10%) y de preservación de 80 % debido a la alta birrefringencia en la mayoría del tejido; color pardo claro y opaco en LPP y birrefringente en el centro con LPC. Además, se presenta un tejido lignificado de  $5\ \mu\text{m}$ , pardo claro, no opaco con LPC; grado de desmenuzamiento de 5% y de preservación del 95%.

También se observan pequeños residuos vegetales carbonizados de  $200\text{-}500\ \mu\text{m}$ ; negros y opacos, sin birrefringencia ni estructura interna.

##### **A2.2.2.2 Material fino amorfo**

Material amorfo globular de superficie rugosa, color opaco y frecuencia de 3 % que se relaciona con la fracción mineral del suelo.

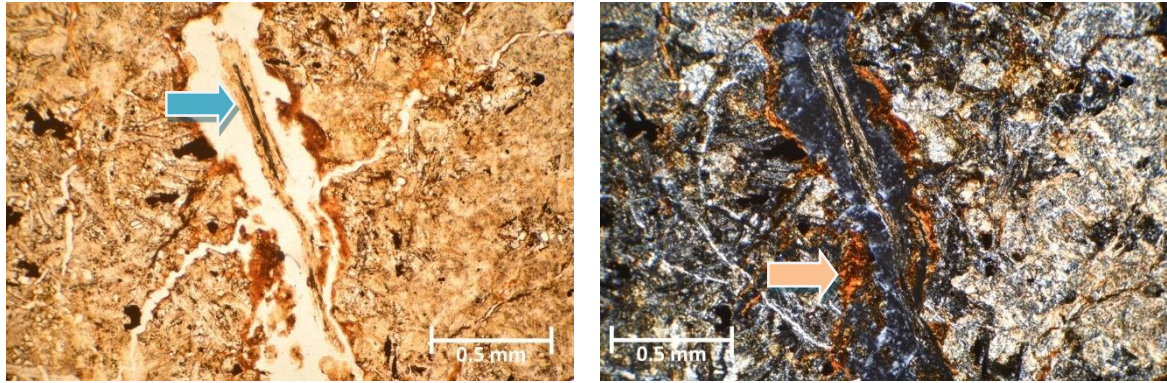


Figura 12. Residuo de raíz (flecha azul) y revestimiento de arcillas. El material es muy birrefringente con arcillas de primer orden (flecha naranja). Izquierda LPP y derecha LPC.

### A2.2.3 Componentes básicos minerales

#### A2231 Granos minerales simple

Granos anhedrales lisos/subredondeados tubulares y blocosos de tamaños de arenas gruesas ( $>500 \mu\text{m}$ ), medias ( $<200 \mu\text{m}$ ) y limos ( $<50 \mu\text{m}$ ); frecuencia de 2% a 10%, respectivamente.

#### A2.2.3.2 Rasgos pedológicos texturales

Revestimientos de arcillas con frecuencia de 5 %, relacionados con poros y granos. Son revestimientos típicos discontinuos y generan una masa basal quitónica y gefúrica. Sus límites son claros y discontinuos.

#### A2.2.3.3 Excrementos

Excrementos de forma elipsoidal con superficie moderadamente rugosa y de tamaño moderadamente delgado ( $180 \times 100 \mu\text{m}$ ); 3% de frecuencia; pardooscuro y pardo. Su patrón de distribución básica es agrupado y su distribución relacionada es mónica.

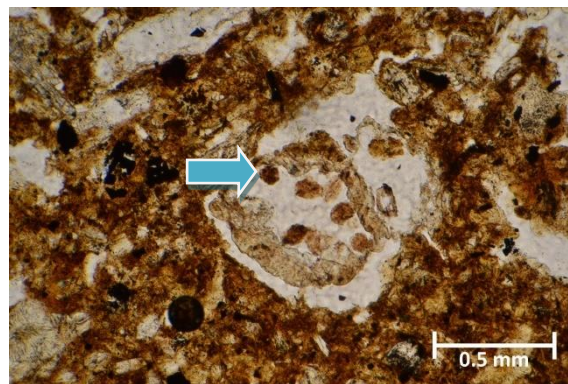


Figura 13. Excrementos de ácaro relacionados con residuos de raíces en LPP.

### A2.3 Descripción micromorfológica del horizonte 2Bwg2 del Phaeozem del pastizal

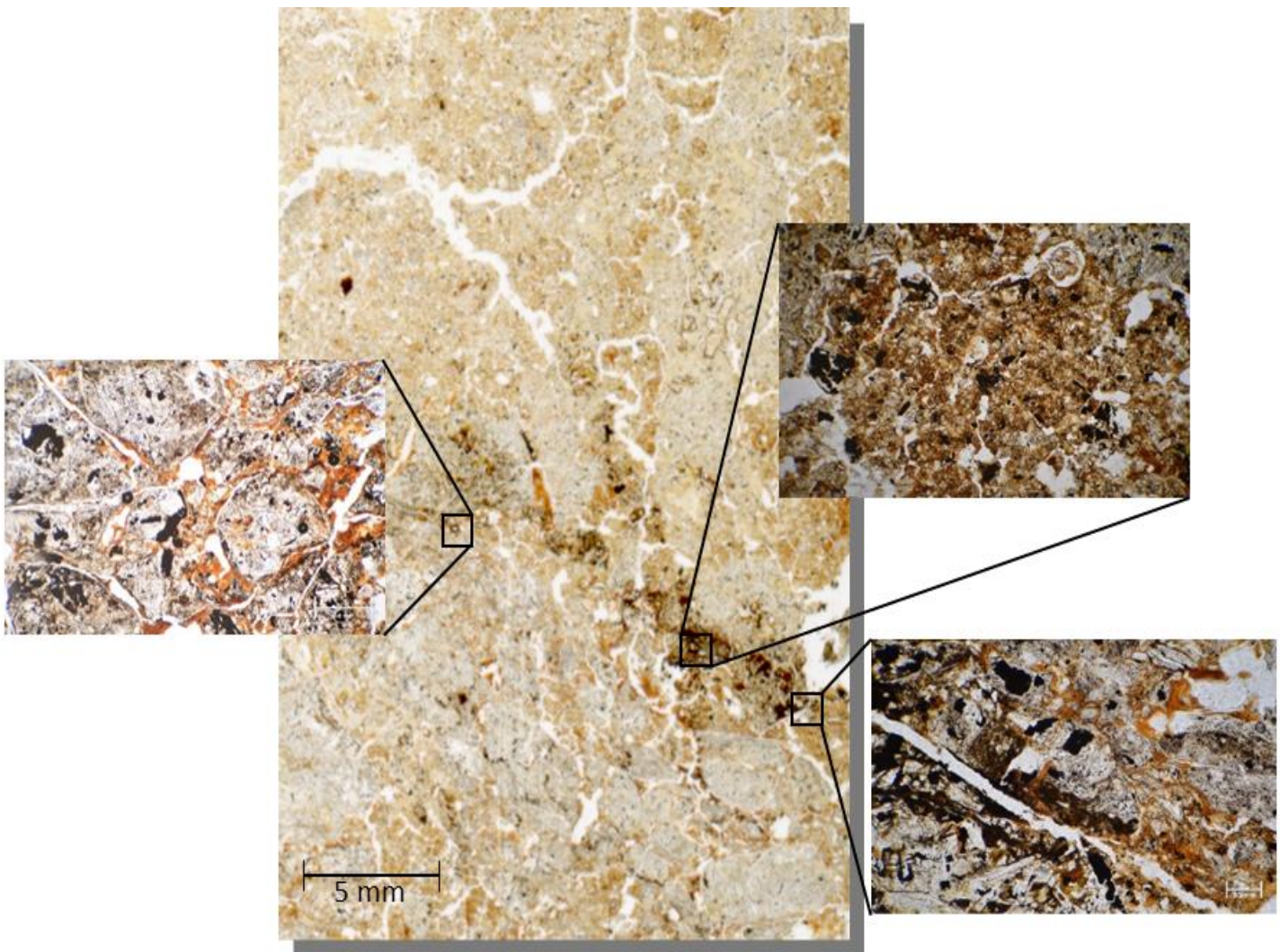


Figura 14. Sección delgada del horizonte 2Bwg2 del Phaeozem en el pastizal.

#### A2.3.1 Microestructura

La estructura es pedregosa 80% fisicogénica y 10% biogénica por influencia de las raíces. Es una estructura compleja de agregados angulares y fisuras.

### A2.3.1.1 Agregados

Agregados en bloques angulares fuertemente desarrollados, de forma bloco con superficie lisa de tamaño arenas gruesas ( $>500\ \mu\text{m}$ ) y medias ( $>200\ \mu\text{m}$ ); frecuencia de 70%; con una distribución relacionada quitónica y gefúrica.

Agregados en bloques subangulares moderadamente desarrollados, de forma redondeada con superficie rugosa de tamaño arenas medias ( $>200\ \mu\text{m}$ ) con una frecuencia del 10%, con una distribución relacionada quitónica y gefúrica generadas por la acumulación de arcillas.

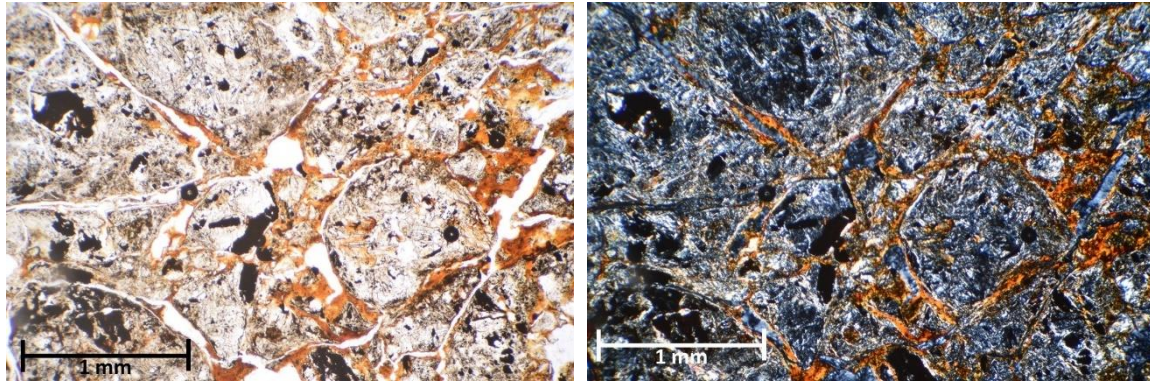


Figura 15. Bloques angulares y subangulares, con revestimientos de arcillas; la fábrica es b-estriada con un componente muy opaco en LPP. Izquierda LPP y derecha LPC.

### A2.3.1.2 Porosidad

Poros fisura inter-agregados en forma recta de tamaño  $\sim 20\ \mu\text{m}$  y frecuencia del 25% de caras lisas. Su patrón de distribución básica es aleatorio y orientación referida no relacionada.

Poros inter-agregados de empaquetamiento compuesto de tamaño que van desde arenas medias ( $<500\ \mu\text{m}$ ) a arenas finas ( $<200\ \mu\text{m}$ ) y frecuencia del 5% de caras lisas. Su patrón de distribución básica es aleatorio y orientación referida no relacionada.

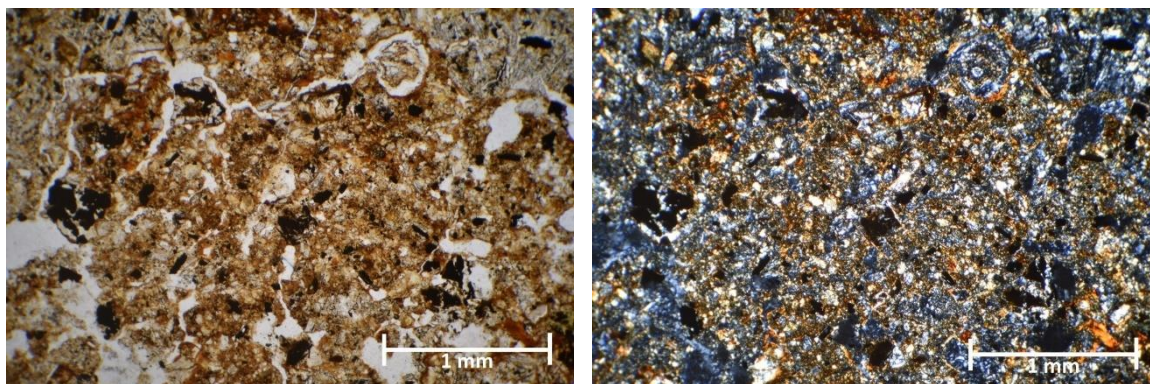


Figura 16. Agregados en bloques subangulares moderadamente desarrollados; fábrica b-moteada. Izquierda LPP y derecha LPC.

## **A2.3.2 Componentes básicos orgánicos**

### **A2.3.2.1 Fracción gruesa**

Residuos de carbón de tamaño 200-500  $\mu\text{m}$ , negros y opacos, sin birrefringencia ni estructura interna.

## **A2.3.3 Componentes básicos minerales**

### **A2.3.3.1 Granos minerales simple**

Granos anhaedrales lisos/subredondeados de hábito blocoso de tamaños de arenas gruesas ( $>500 \mu\text{m}$ ), medias ( $<200 \mu\text{m}$ ) con una frecuencia del 50% y 20% respectivamente.

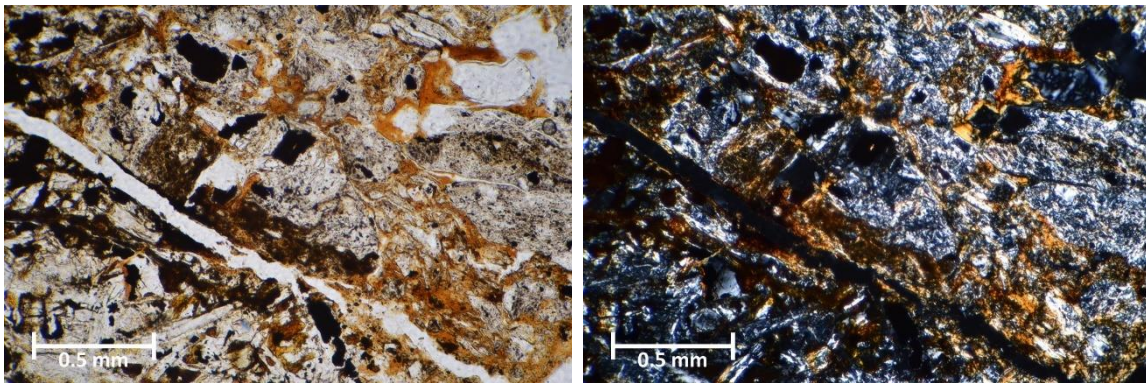


Figura 17. Fisura recubierta de arcilla, bien orientada. Izquierda LPP y derecha LPC.

### **A2.3.3.2 Rasgos pedológicos texturales**

Revestimientos de arcillas con frecuencia del 10 % en poros y granos. Son revestimientos típicos discontinuos y tienen distribución relacionada quitónica y gefúrica. Sus límites son claros y discontinuos.

## A2.4 Descripción micromorfológica del horizonte 3Cg del Phaeozem del pastizal

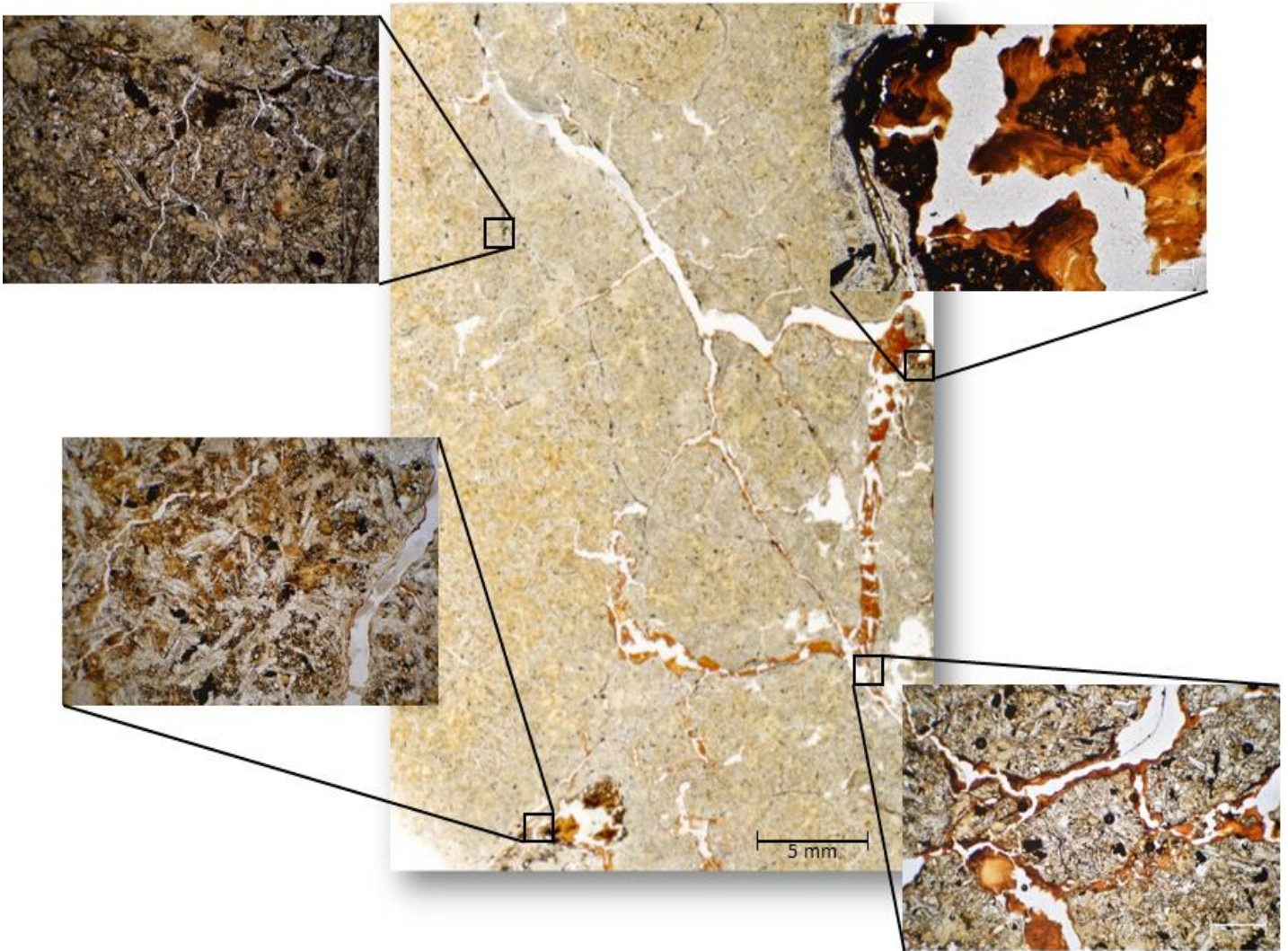


Figura 18. Sección delgada del horizonte 3Cg del Phaeozem en el pastizal.

### A2.4.1 Microestructura

Pedal 100% fisicogénica.



#### A2.4.1.1 Agregados

Agregados en bloques angulares débilmente desarrollados, de forma blocosa con superficie lisa de tamaño arenas gruesas ( $>500\ \mu\text{m}$ ) y medias ( $>200\ \mu\text{m}$ ) con frecuencia del 70%; con una distribución relacionada quitónica y gefúrica.

#### A2.4.1.2 Porosidad

Poros fisura inter-agregados en forma recta, de tamaño  $\sim 30\ \mu\text{m}$  y frecuencia de 25% decaras lisas. Su patrón de distribución básica es aleatorio y orientación referida no relacionada.

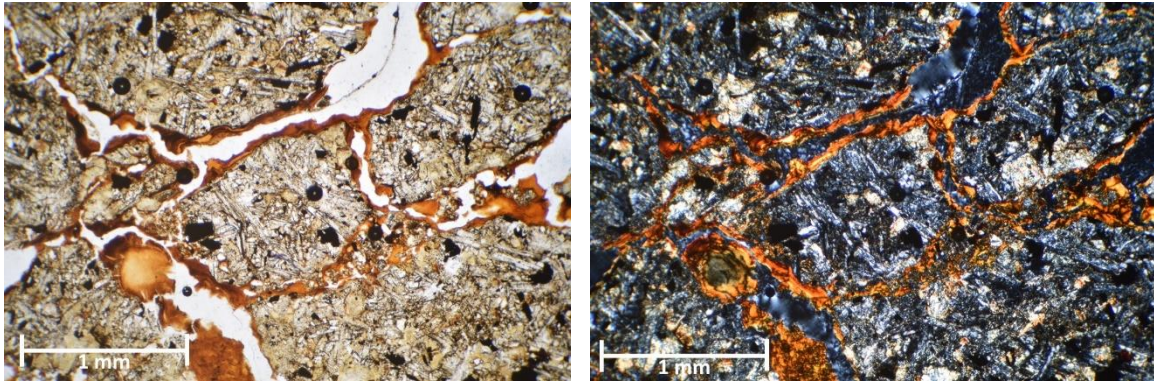


Figura 19. Revestimientos de arcillas en poros y granos en el horizonte 3Cg Izquierda LPP y derecha LPC.

#### A2.4.1.2 Material fino amorfo

Material amorfo globular de superficie rugosa, color opaco y frecuencia de 5 %, relacionados con la fase mineral.

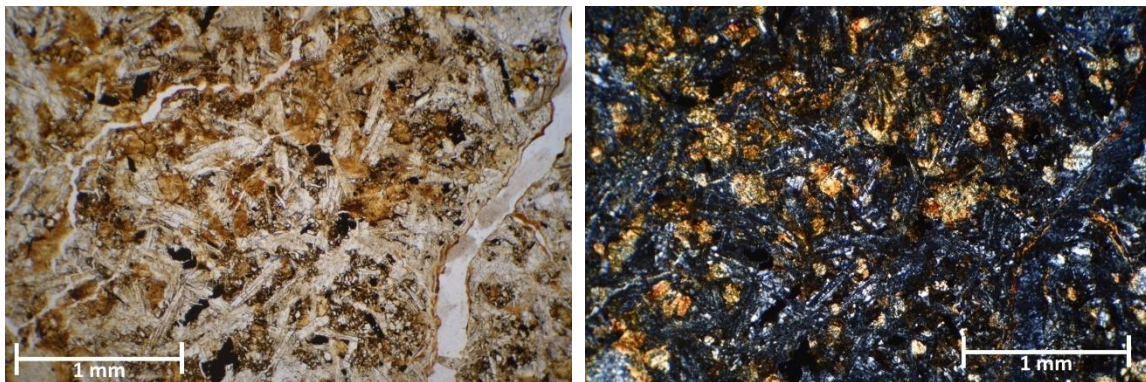


Figura 20. Minerales y recubrimientos de arcilla, en una fábrica b-moteada. Izquierda LPP y derecha LPC.

## A2.4.2 Componentes básicos minerales

### A2.4.2.1 Granos minerales simple

Granos anhedrales lisos/sub-redondeados de hábito blocoso de tamaños de arenas gruesas ( $>500\ \mu\text{m}$ ), medias ( $<200\ \mu\text{m}$ ) con una frecuencia del 50% y 20% respectivamente.

### A2.4.2.2 Rasgos Pedológicos Texturales

Revestimientos de arcillas de 15% relacionados con los poros fisura, principalmente en poros gruesos donde su espesor es de 0.5 mm Son revestimientos típicos continuos y tienen una distribución relacionada quitónica y gefúrica. Sus límites son claros y discontinuos.

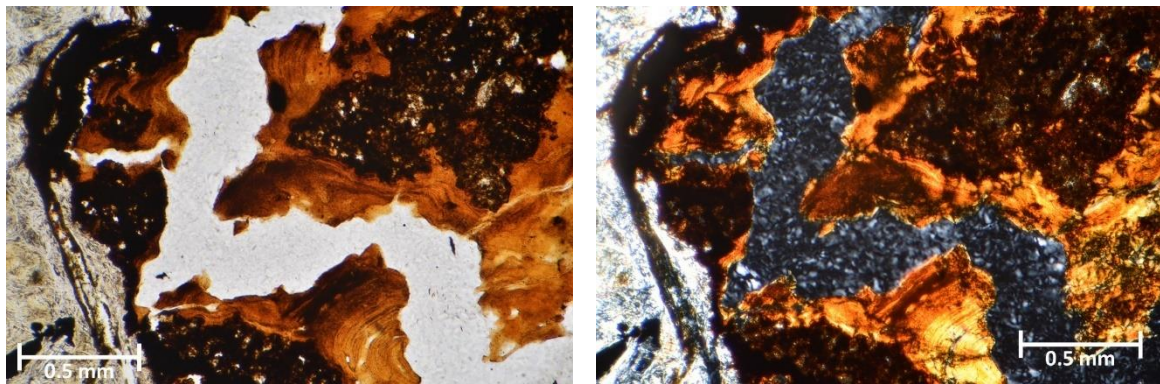


Figura 21. Revestimientos de arcilla en poros fisura. Izquierda LPP y derecha LPC.

## A2.5 Descripción micromorfológica del horizonte Ah1 del Phaeozem del acahual

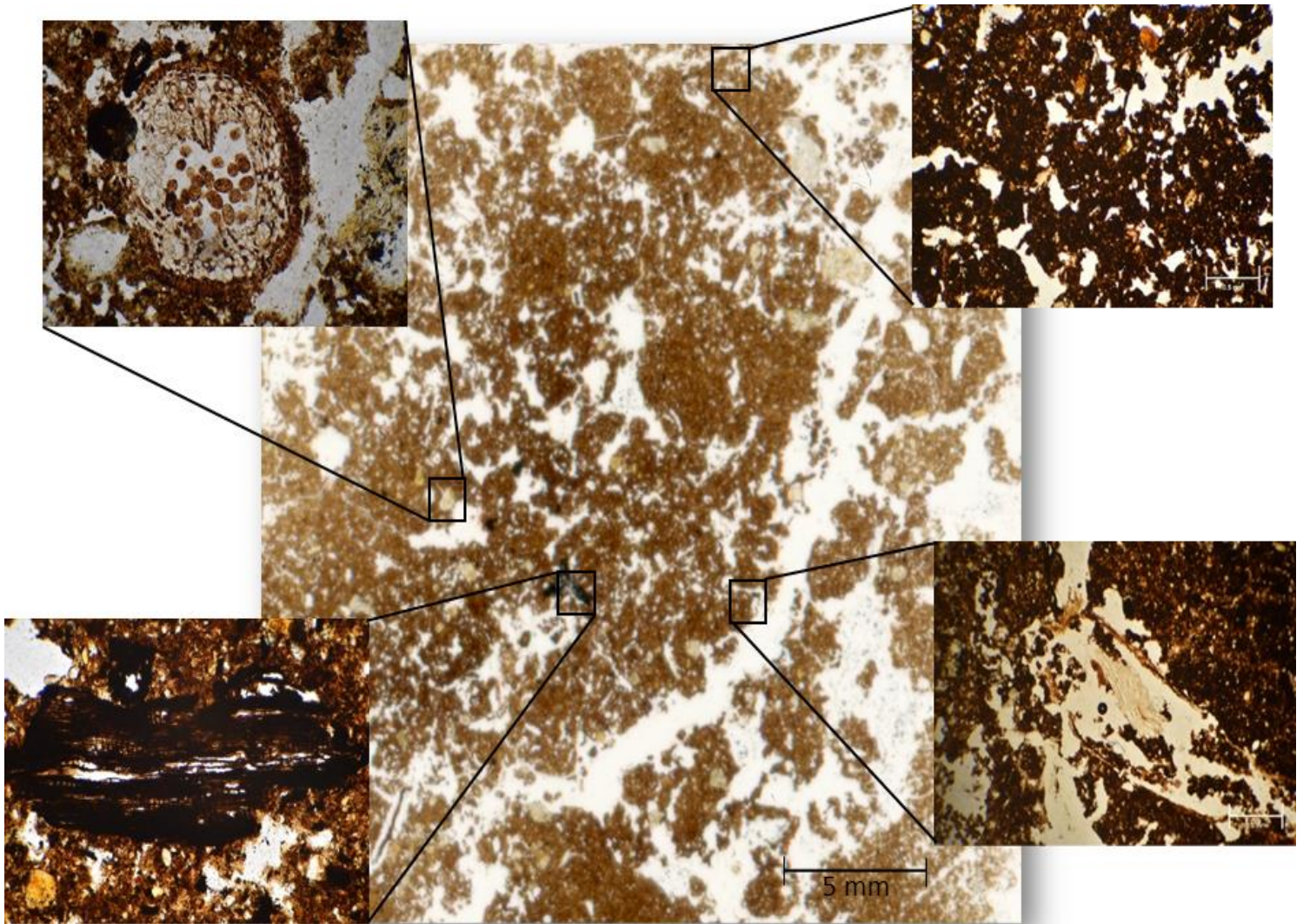


Figura 22. Sección delgada del horizonte Ah1 del Phaeozem en el acahual.

### A2.5.1 Microestructura

La estructura es pedal 100% biogénica, compuesta por agregados migajosos y granulares.

### A2.5.1.1 Agregados

Agregados granulares fuertemente desarrollados, de forma subredondeada con superficie ondulada de tamaño arenas gruesas ( $>500\ \mu\text{m}$ ) y medias ( $500\text{-}200\ \mu\text{m}$ ), 50%; distribución relacionada enáulica.

Agregados migajosos moderadamente desarrollados, de superficie rugosa de tamaño arenas medias ( $500\text{-}200\ \mu\text{m}$ ) y finas ( $>50\ \mu\text{m}$ ), 10%; distribución relacionada enáulica de agregados con microagregados.

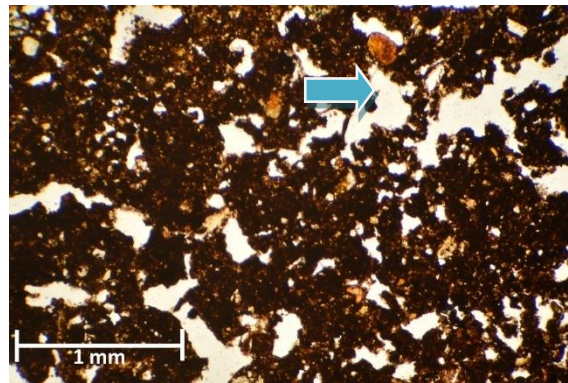


Figura 23. Agregados granulares y migajosos, moderadamente desarrollados, con poros cavidad (flecha azul) y poros de empaquetamiento compuesto en LPP.

### A2.5.1.2 Porosidad

Poros inter-agregados: Poros de empaquetamiento compuesto de  $\sim 10\ \mu\text{m}$ , 35% y con patrón de distribución aleatorio. Poros cavidad de  $<10\ \mu\text{m}$  con frecuencia de 5% entre los agregados de formas redondeadas y regulares.

Poros intra-agregados: Poros cavidad de  $<10\ \mu\text{m}$  con frecuencia de 5% dentro de los agregados de formas redondeadas y regulares.

## A2.5.2 Componentes básicos orgánicos

### Límite g/f $10\ \mu\text{m}$

#### A2.5.2.1 Fracción gruesa

Raíces de 1-2 mm de tamaño en donde se observa su cilindro vascular en el centro, con desmenuzamiento  $>70\%$  y de preservación de 30%. Se observa baja birrefringencia en el centro del tejido, es de color pardo claro, opaco en luz plana y brillante en luz polarizada. Se

observa su tejido lignificado de grosor de 5  $\mu\text{m}$ , un moderado grado de desmenuzamiento de 50% y un grado de preservación de 50%; tiene un color pardo claro.

También se observan pequeños residuos carboníferos de <12  $\mu\text{m}$ , negros y opacos, sin birrefringencia ni estructura interna.

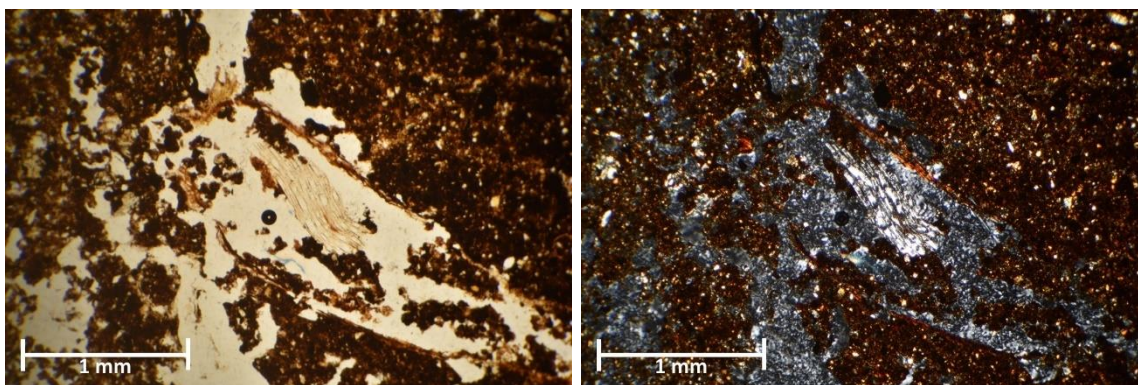


Figura 24. Agregados granulares y contorno de raíz. Izquierda LPP y derecha LPC.

#### **A2.5.2.2 Material fino amorfo**

Material amorfo de forma globular de superficie rugosa, opaco, frecuencia de 10%; se acumula dentro de los agregados. También se observan pigmentos orgánicos dentro de los agregados, 20  $\mu\text{m}$ , pardo y opaco de 5%.

#### **A2.5.3 Componentes básicos minerales**

##### **A2.5.3.1 Granos minerales simple**

Granos anhedrales de tamaño arenas muy finas (< 100  $\mu\text{m}$ ), moderadamente ordenado con distribución aleatoria.

##### **A2.5.3.2 Masa basal**

Fábrica-b moteada, pobremente ordenada, con patrones de distribución relacionada compleja g/f porfídica de grano simple dentro de los agregados.

##### **A2.5.3.3 Rasgos pedológicos**

#### **Excrementos**

Excrementos de forma elipsoidal con superficie moderadamente rugosa y de tamaño moderadamente delgado (180  $\times$  100  $\mu\text{m}$ ); 15%, pardos oscuros y pardos. Su patrón de

distribución básica es agrupado y su distribución relacionada es mónica.

#### A2.5.3.4 Rellenos

Relleno discontinuo de excrementos en grupos que se encuentran en el centro de la raíz.

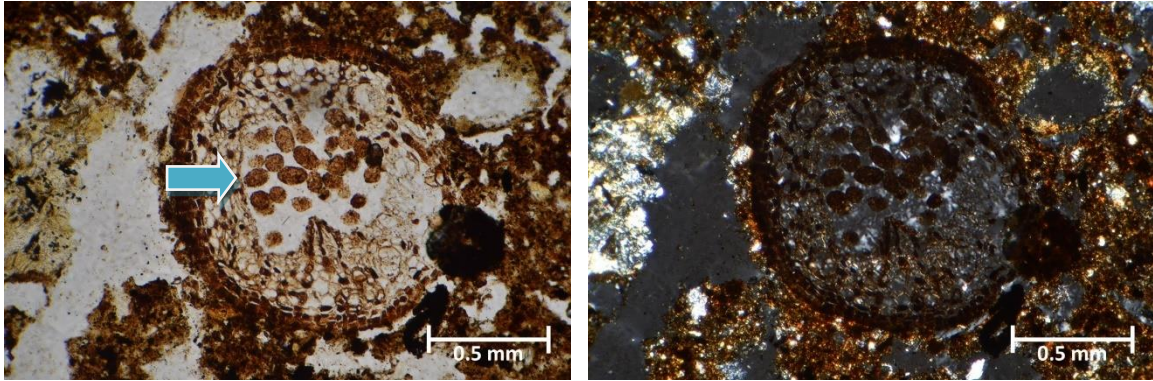


Figura 25. Relleno de excrementos en grupo en el centro de la raíz (flecha azul).  
Izquierda LPP y derecha LPC.

## A2.6 Descripción micromorfológica del horizonte Ah2 del Phaeozem del acahual

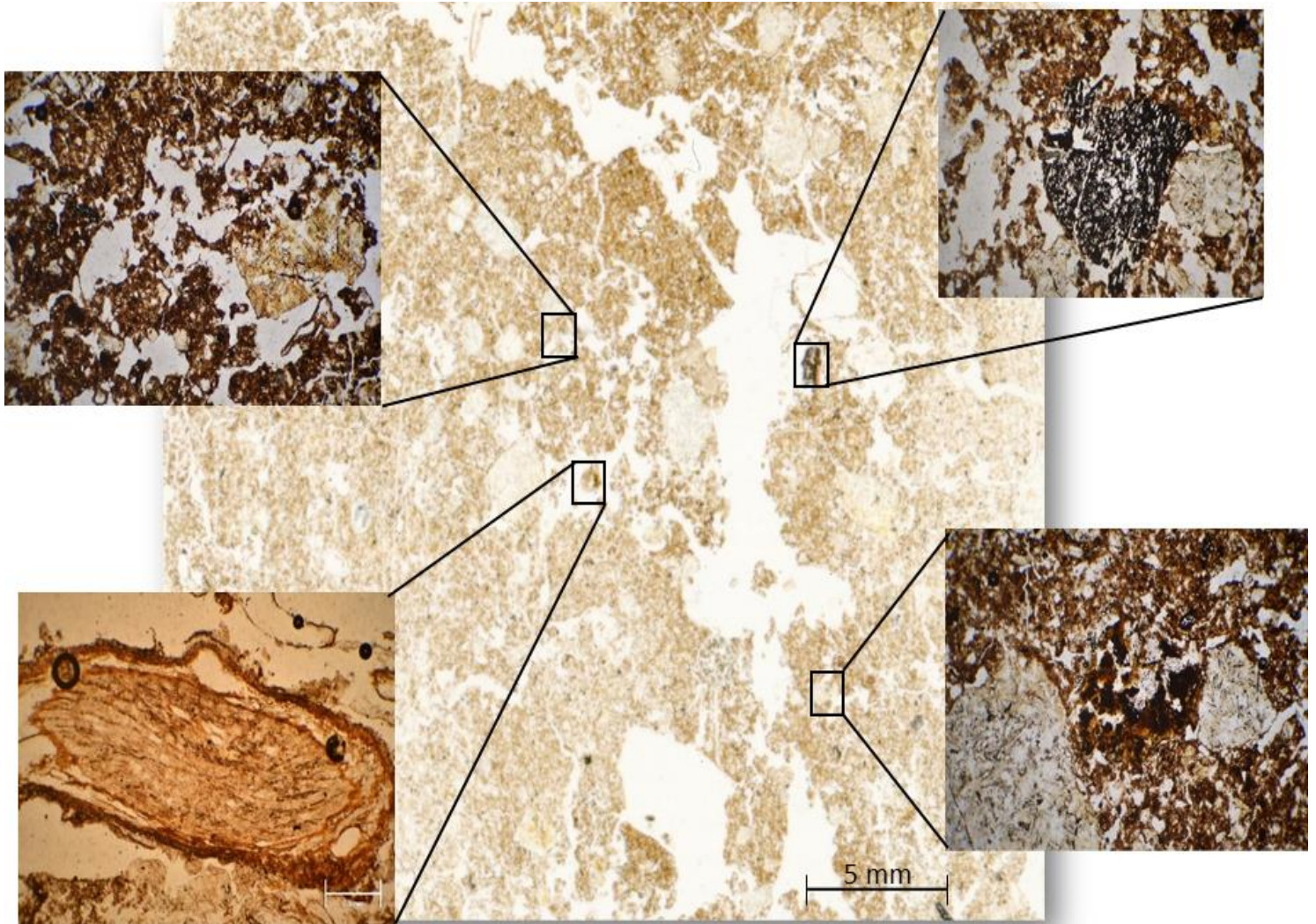


Figura 26. Sección delgada del horizonte Ah2 del Phaeozem en el acahual.

### A2.6.1 Microestructura

La estructura es pedal 100% biogénica, migajosa y granular.

### A2.6.1.1 Agregados

Agregados granulares de fuerte a moderadamente desarrollados, superficie ondulada, tamaño de arenas medias (500-200  $\mu\text{m}$ ) y arenas finas (200-50  $\mu\text{m}$ ), 55%; distribución relacionada enáulica.

Agregados migajosos moderadamente desarrollados, de superficie rugosa; tamaño de arenas gruesas (2000-500  $\mu\text{m}$ ), 10%; distribución relacionada enáulica de agregados con microagregados.

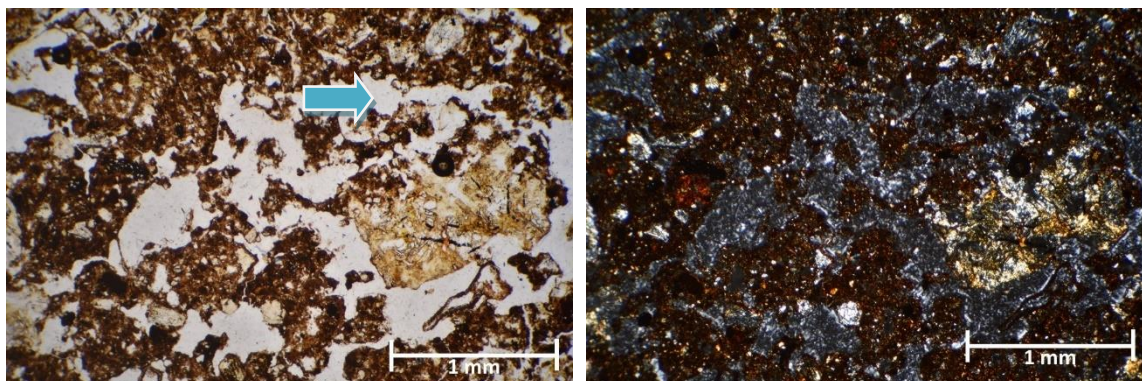


Figura 27. Agregados granulares y migajosos, moderadamente desarrollados, con poros de empaquetamiento compuesto (flecha azul). Izquierda LPP y derecha LPC.

### A2.6.1.2 Porosidad

Poros inter-agregados: Poros de empaquetamiento compuesto de 10 a 50  $\mu\text{m}$ ; 35% y patrón de distribución aleatorio. Poros cavidad <10  $\mu\text{m}$  con frecuencia de 5% entre los agregados de formas redondeadas y regulares.

Poros intra-agregados: Poros cavidad <10  $\mu\text{m}$  con frecuencia de 5% dentro de los agregados de formas redondeadas y regulares.

### A2.6.2 Componentes básicos orgánicos

#### Límite g/f 10 $\mu\text{m}$

#### A2.6.2.1 Fracción gruesa

Tejidos parenquimáticos en donde se observa su cilindro vascular en el centro de 0.4 a 2 mm con desmenuzamiento de <2% y de preservación de 98%, pardo claro, opaco en LPP y muy brillante en LPC. Se observan células alargadas con desmenuzamiento de 5% y preservación de 95%; muestra birrefringencia en la pared celular. También se observa su



tejido lignificado de 10  $\mu\text{m}$ , desmenuzamiento de 2% y preservación de 98% debido a alta birrefringencia en todo el tejido; pardo claro.

Residuos vegetales carbonizados en el centro del contorno,  $\sim 15 \mu\text{m}$ ; negros y opacos, sin birrefringencia ni estructura interna.

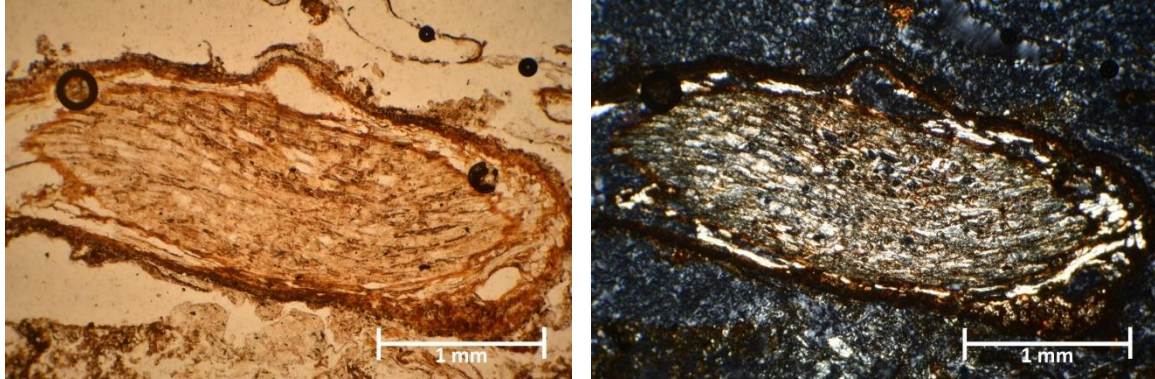


Figura 28. Tejido parenquimático de residuo de raíz, moderadamente preservada. Izquierda LPP y derecha LPC.

#### A2.6.2.2 Material fino amorfo

Material amorfo de superficie rugosa, opaco, 3%; se acumulan dentro de los agregados. También se observan pigmentos orgánicos en los agregados de 20  $\mu\text{m}$ , pardos y opacos de frecuencia de 5%.

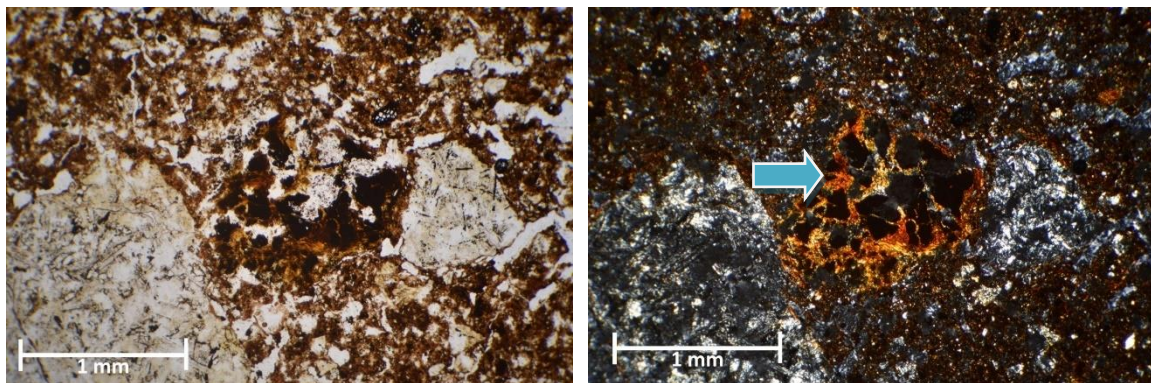


Figura 29. Acumulación de arcilla entre agregados (flecha azul). Izquierda LPP y derecha LPC.

### **A2.6.3 Componentes básicos minerales**

#### **A2.6.3.1 Granos minerales simple**

Granos anhedrales de tamaño arenas muy finas ( $< 100 \mu\text{m}$ ), moderadamente ordenados y distribución aleatoria.

#### **A2.6.3.2 Masa basal**

Fábrica-b moteada, pobremente ordenados, distribución relacionada compleja g/f porfídica de grano simple dentro de los agregados.

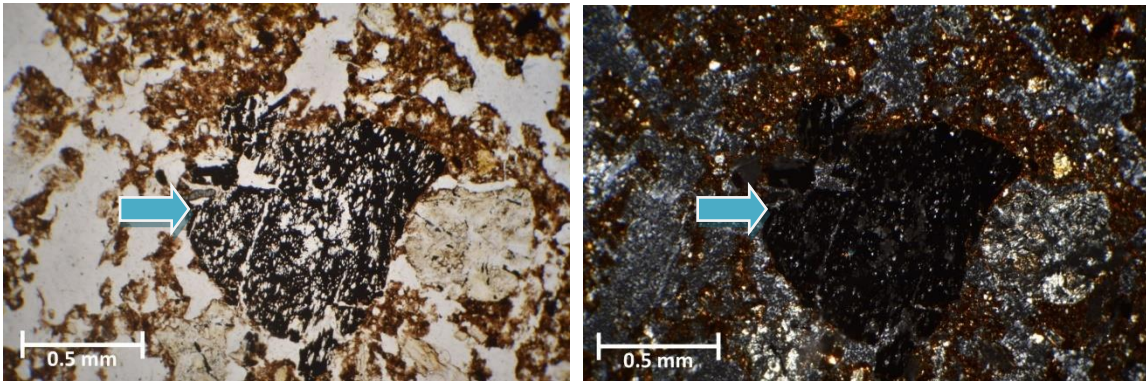


Figura 30. Material orgánico carbonizado (flecha azul). Izquierda LPP y derecha LPC.

### **A2.6.4 Rasgos pedológicos**

#### **A2.6.4.2 Excrementos**

Excrementos de forma elipsoidal con superficie moderadamente rugosa y moderadamente delgado ( $180 \times 100 \mu\text{m}$ ), 5%; pardos oscuros. Su patrón de distribución básica es agrupado y su distribución relacionada es mónica.

#### **A2.6.4.3 Relleno**

Relleno discontinuo de excrementos en grupo rellenando un poro canal.

## A2.7 Descripción micromorfológica del horizonte AB del Phaeozem del acahual

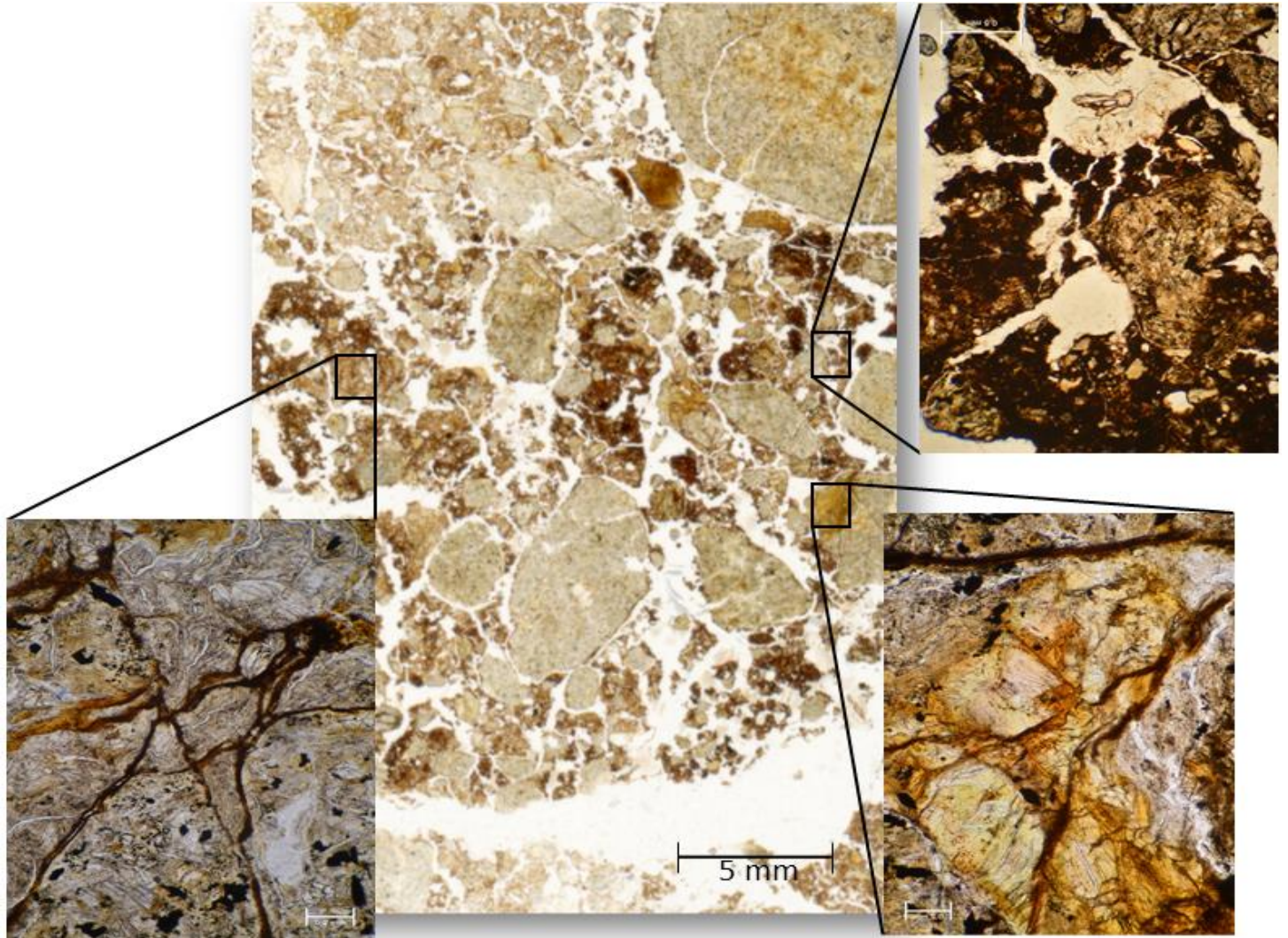


Figura 31. Sección delgada del horizonte 2ABw del Phaeozem en el acahual.

### A2.7.1 Microestructura

Estructura pedal 50% biogénica y 50% fisicogénica, bloques subangulares y granulares.

### A2.7.1.1 Agregados

Agregados en bloques subangulares moderadamente desarrollados, superficie lisa, tamaño arenas gruesas (2000-500  $\mu\text{m}$ ), 35%; arenas medias (500-200  $\mu\text{m}$ ) y arenas finas (200-50  $\mu\text{m}$ ), 25%; distribución relacionada enélica de agregados con microagregados.

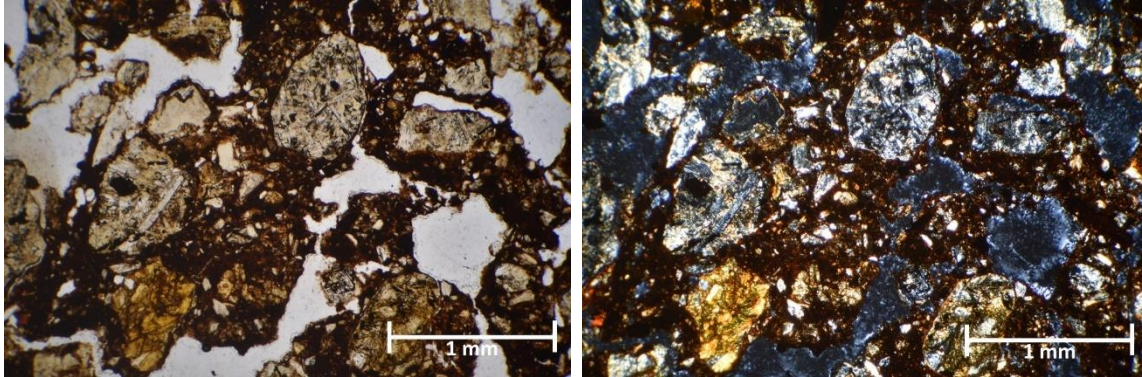


Figura 32. Agregados en bloques subangulares moderadamente desarrollados; fabrica-b moteada. Izquierda LPP y derecha LPC.

### A2.7.1.2 Porosidad

Poros inter-agregados: Poros de empaquetamiento compuesto de  $\sim 10 \mu\text{m}$ ; frecuencia de 35% y con patrón de distribución aleatorio. Se observan algunos poros grietas de  $< 10 \mu\text{m}$  con frecuencia de 5% aleatorias.

### A2.7.2 Componentes básicos orgánicos

#### Límite g/f 10 $\mu\text{m}$

#### A2.7.2.1 Fracción gruesa

Tejidos parenquimáticos con desmenuzamiento de  $\sim 70\%$  y preservación de 30%; pardos claros, opacos en LPP y el centro es muy birrefringente en LPC.

Contornos lignificados con desmenuzamiento de 30% y preservación de 70%; birrefringencia de la pared celular en LPC.

Material orgánico carbonizado en el centro del contorno lignificado, de  $< 12 \mu\text{m}$ , negros y opacos, sin birrefringencia en LPC, ni estructura interna.

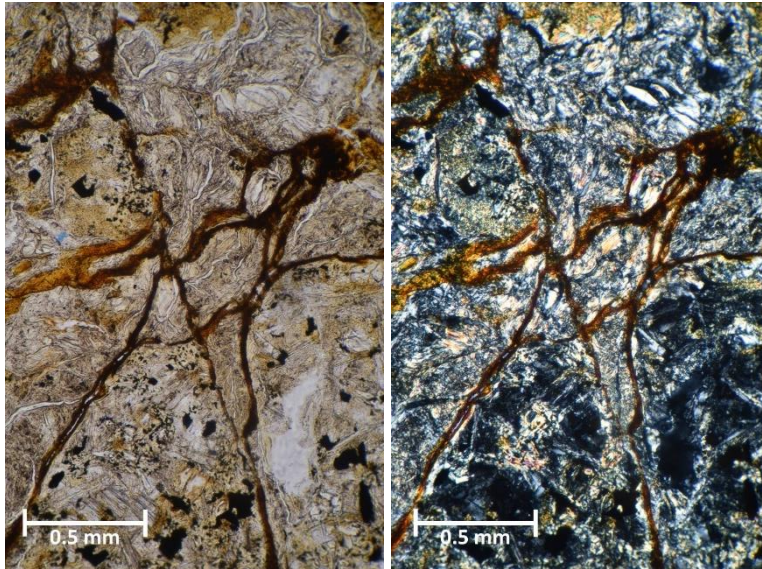


Figura 33. Revestimientos y rellenos densos completos en fisuras. Derecha luz plana e izquierda luz plana polarizada.

#### **A2.7.2.2 Material fino amorfo**

Material amorfo, opaco, 3%, se encuentra dentro de los agregados. También se observan pigmentos orgánicos dentro de los agregados de 20  $\mu\text{m}$ , pardos opacos y frecuencia de 5%.

#### **A2.7.3 Componentes básicos minerales**

##### **A2731 Granos minerales simples**

Granos de forma redondeada anhedral. de tamaño arenas finas ( $< 100 \mu\text{m}$ ), moderadamente ordenado con distribución aleatoria.

##### **A2.7.3.2 Masa basal**

Fábrica-b cristalítica, pobremente ordenados, con patrones de distribución relacionada compleja g/f porfírica de grano simple dentro de los agregados. Alto contenido de arcillas totalmente desorganizadas.

## A2.7.4 Rasgos Pedológicos

### A2.7.4.1 Texturales

Revestimientos de arcillas en las fisuras, frecuencia de 5 %. Son revestimientos típicos discontinuos y tienen distribución relacionada quitónica y gefúrica. Sus límites son claros y discontinuos.

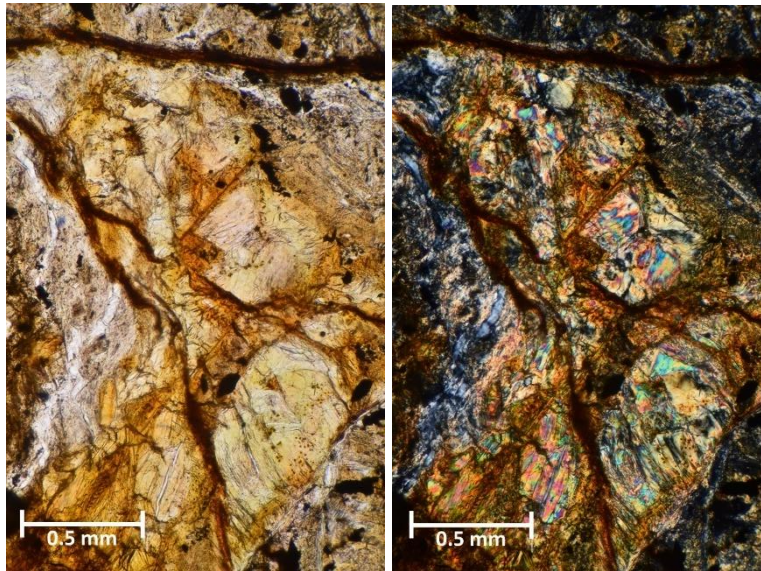


Figura 34. Material parental de lutitas ricas en arcillas; revestimientos de arcillas en fisuras. Izquierda LPP y derecha LPC.

## A2.8 Descripción micromorfológica del horizonte 3Bw del Phaeozem del acahual

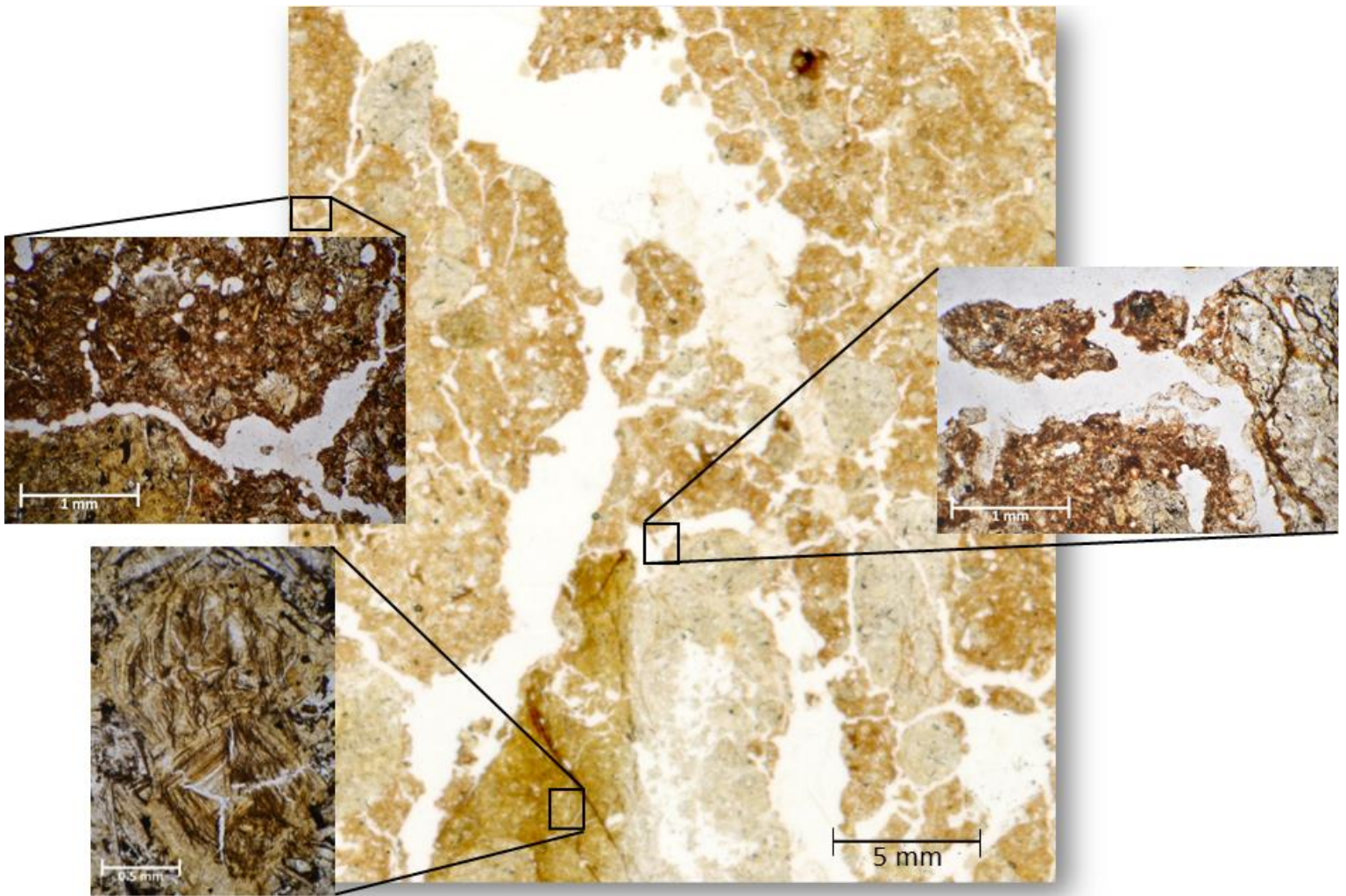


Figura 35. Sección delgada del horizonte 3Bw del Phaeozem en el acahual.

### A2.8.1 Microestructura

Estructura 100% fisicogénica en bloques angulares.

#### A2.8.1.1 Agregados

Agregados en bloques angulares fuertemente desarrollados, superficie lisa, de tamaño arenas gruesas (2000-500  $\mu\text{m}$ ) de frecuencia del 70%, con distribución relacionada enélica de agregados con microagregados.

Microagregados en bloques subangulares de moderado a fuertemente desarrollados, de superficie rugosa de tamaño arenas medias (>250  $\mu\text{m}$ ) de frecuencia del 10%, con

distribución relacionada enéutica de agregados con microagregados.

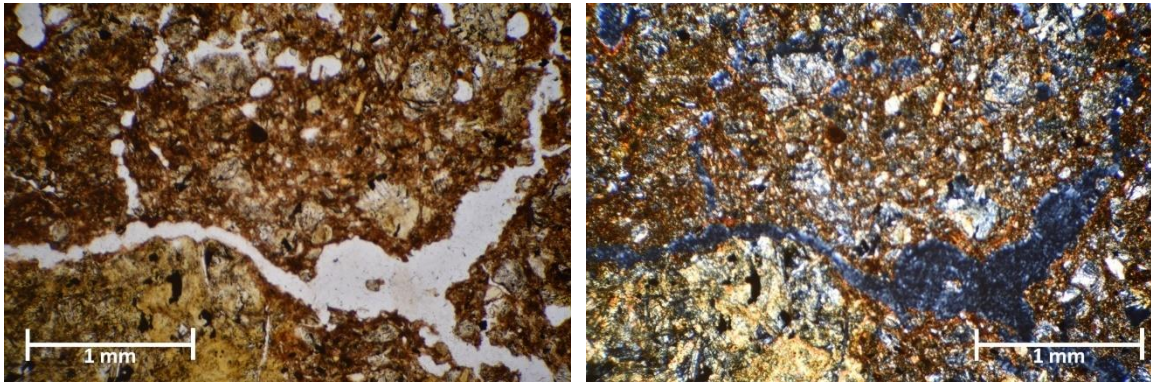


Figura 36. Agregados en bloques angulares y subangulares con poros de empaquetamiento compuesto. Izquierda LPP y derecha LPC.

#### **A2.8.1.2 Porosidad**

Poros inter-agregados: Poros de empaquetamiento compuesto de  $\sim 10 \mu\text{m}$ , frecuencia de 10% y arreglo aleatorio. Fisuras curvadas de  $10 \times 1000 \mu\text{m}$  y frecuencia de 15%. Tienen orientación referida perpendicular a la platina y se mantienen paralelas entre ellas.

#### **A2.8.2 Componentes básicos orgánicos**

##### **Límite g/f $10 \mu\text{m}$**

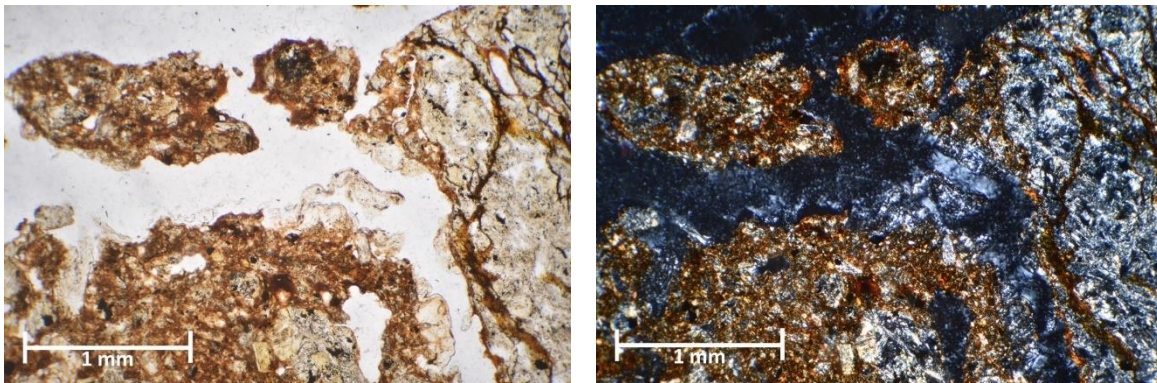


Figura 37. Bloques subangulares, con revestimientos y rellenos de arcilla. Izquierda LPP y derecha LPC.

#### **A2.8.2.1 Material fino amorfo**

Material amorfo de forma globular de superficie rugosa, color opaco y frecuencia del 3% que se encuentran dentro de los agregados.

#### **A2.8.3 Componentes básicos minerales**



### **A2.8.3.1 Granos minerales simple**

Granos anhedrales de tamaño arenas finas ( $< 100 \mu\text{m}$ ), moderadamente ordenados y distribución aleatoria.

### **A2.8.3.2 Masa basal**

Fábrica-b moteada, pobremente ordenada, patrón de distribución relacionada compleja g/f porfídica de grano simple dentro de los agregados.

### **A2.8.4 Rasgos pedológicos**

#### **Texturales**

Revestimientos de arcillas dentro de los poros fisuras, frecuencia de 5 %, típicos discontinuos y en algunas partes son continuos; distribución relacionada quitónica y gefúrica; límites claros y discontinuos.

#### **A2.8.4.1 Amorfos**

Nódulos de Fe nucleados de tamaños de  $\sim 10 \mu\text{m}$  con frecuencia del 3%; color en LPP opaco y en LPC con luz incidente refleja colores rojizos y naranjas; límites claros.

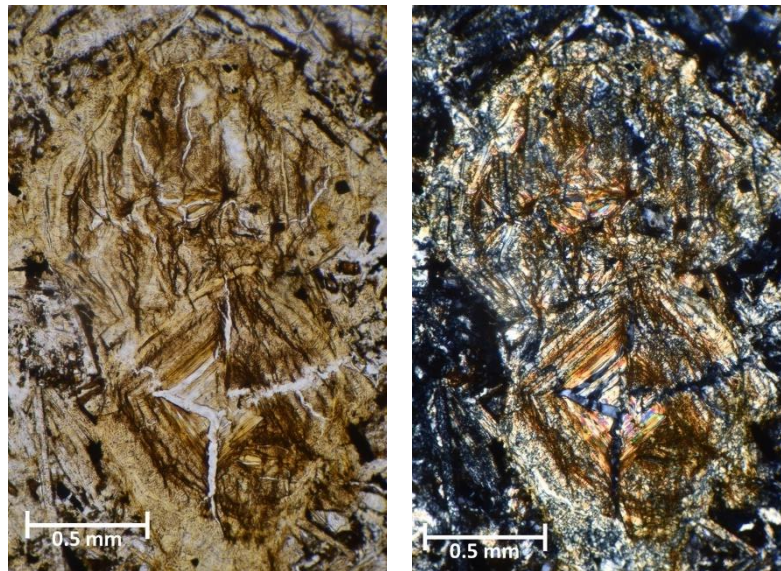


Figura 38. Revestimientos de arcillas. Izquierda LPP y derecha LPC.

## A2.9 Descripción micromorfológica del horizonte Ah del Umbrisol del bosque.

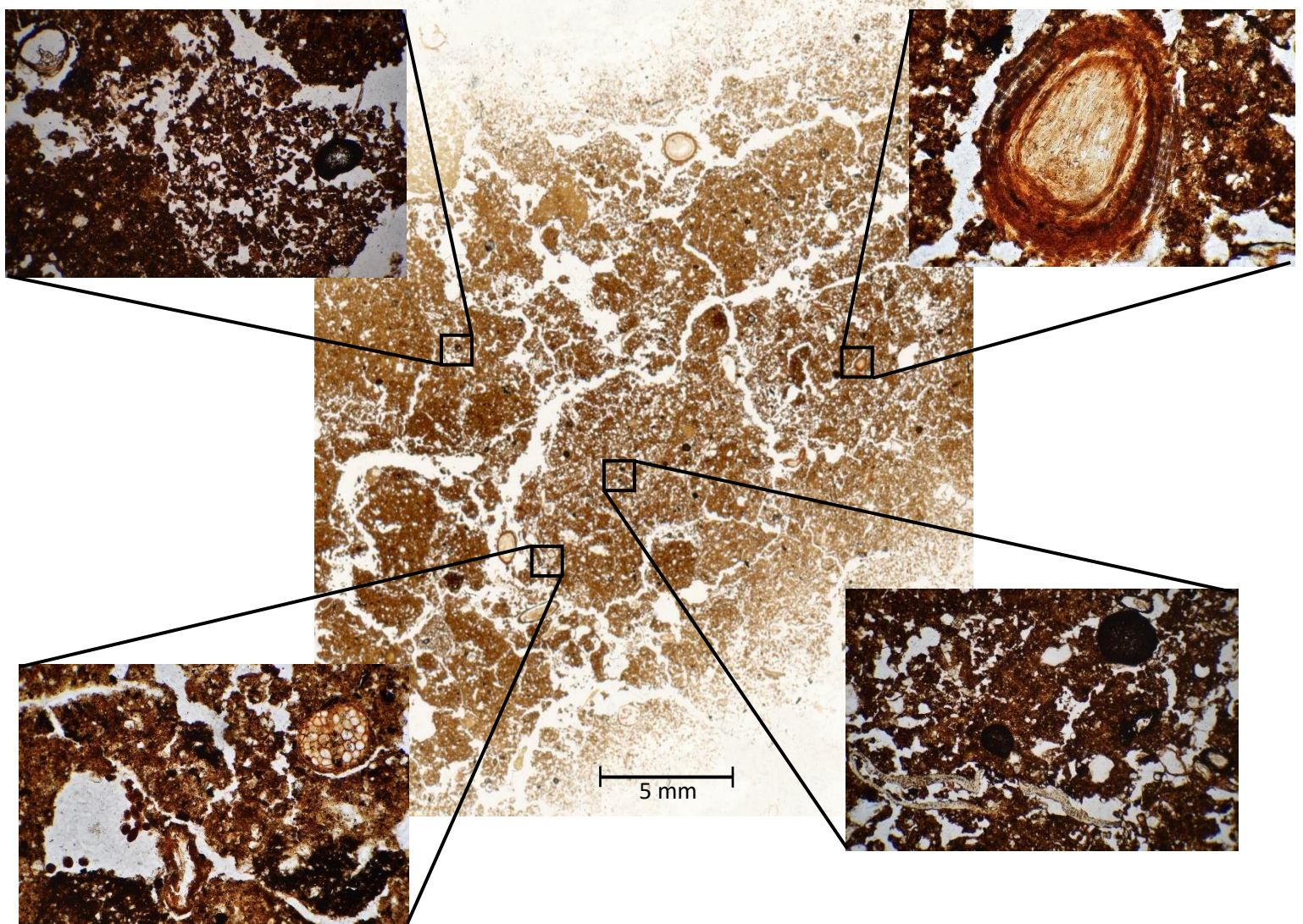


Figura 39. Sección delgada del horizonte Ah del Umbrisol en el bosque.

### A2.9.1 Microestructura

Estructura pedal 100% biogénica en bloques subangulares y agregados granulares.

### **A2.9.1.1 Agregados**

Bloques subangulares fuertemente desarrollados, superficie lisa de tamaño arenas gruesas (~2000  $\mu\text{m}$ ) y arenas medias (500  $\mu\text{m}$ ), frecuencia de 60%; distribución relacionada enáulica.

Agregados granulares dentro de los agregados subangulares moderado a fuertemente desarrollados, superficie rugosa de tamaño arenas finas (200-50  $\mu\text{m}$ ) y limos (<50  $\mu\text{m}$ ), frecuencia de 60%; distribución relacionada enáulica de agregados con microagregados.

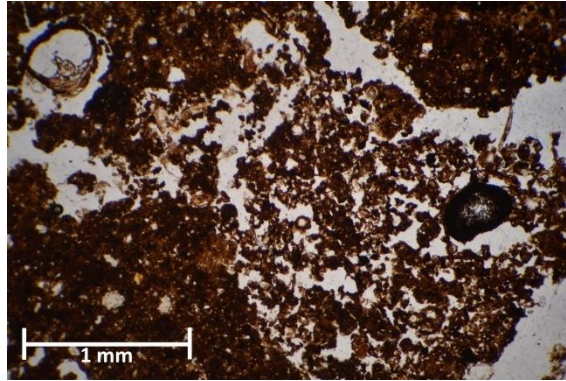


Figura 40. Agregados granulares fuertemente desarrollados dentro de bloques subangulares en LPP.

### **A2.9.1.2 Porosidad**

Poros inter-agregados: Poros de empaquetamiento compuesto de ~100  $\mu\text{m}$ , frecuencia de 40% y arreglo aleatorio.

Poros intra-agregados: Poros de empaquetamiento compuesto de ~10  $\mu\text{m}$ , frecuencia de 30%. Poros cavidad de <10  $\mu\text{m}$ , frecuencia de 5%, dentro de los agregados de formas redondeadas y regulares.

### **A2.9.2 Componentes básicos orgánicos**

#### **Límite g/f 10 $\mu\text{m}$**

#### **A2.9.2.1 Fracción gruesa**

Tejidos parenquimáticos de 1 mm con cilindro vascular en el centro de 0.4 mm con desmenuzamiento de <2% y preservación de 98%; alta birrefringencia en todo el tejido, pardo claro, opaco en LPP y muy brillante en LPC.

Tejido parenquimático de células alargadas con desmenuzamiento de 10% y preservación de 90%; alta birrefringencia en la pared celular.

Tejido lignificado de  $10\ \mu\text{m}$ , desmenuzamiento de 2% y preservación de 98%; pardo claro en LPP y alta birrefringencia en todo el tejido en LPC.

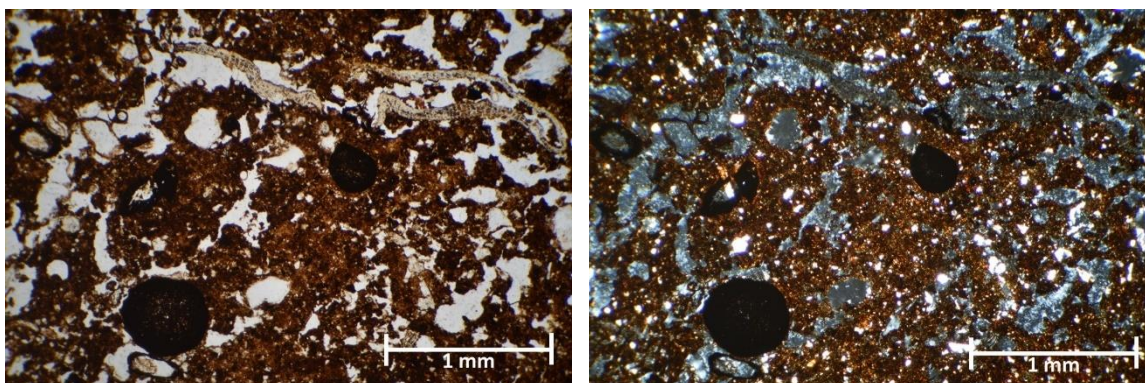


Figura 41. Amorfos de material fino orgánico entre agregados granulares; fábrica-b moteada. Izquierda LPP y derecha LPC.

#### A2.9.2.2 Material fino amorfo

Material amorfo globular de superficie rugosa, opaco y frecuencia de 10% que se encuentran dentro de los agregados.

Pigmentos orgánicos dentro de los agregados de  $20\ \mu\text{m}$ , pardo opaco y frecuencia de 5%.

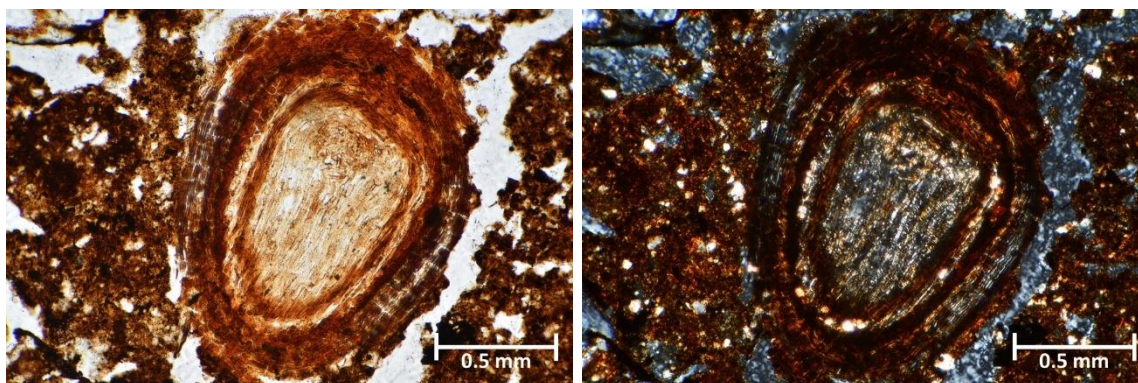


Figura 42. Tejido de raíz, moderadamente descompuesto con agregados esferoidales; fábrica-b moteada. Izquierda LPP y derecha LPC.

### **A2.9.3 Componentes básicos minerales**

#### **A2.9.3.1 Granos minerales simple**

Granos anhedrales de tamaño arenas finas ( $< 100 \mu\text{m}$ ), moderadamente ordenados con distribución aleatoria.

#### **A2.9.3.2 Masa basal**

Fábrica-b moteada, pobremente ordenados, patrón de distribución relacionada compleja g/f porfídica de grano simple dentro de los agregados.

### **A2.9.4 Rasgos pedológicos**

#### **A2.9.4.1 Excrementos**

Excrementos de forma elipsoidal moderadamente rugosos y delgados ( $180 \times 100 \mu\text{m}$ ), frecuencia de 25%; pardos oscuros y pardos; patrón de distribución agrupado y distribución relacionada mónica.

#### **A2.9.4.2 Relleno**

Relleno discontinuo de poro canal que consiste en excrementos en grupo.

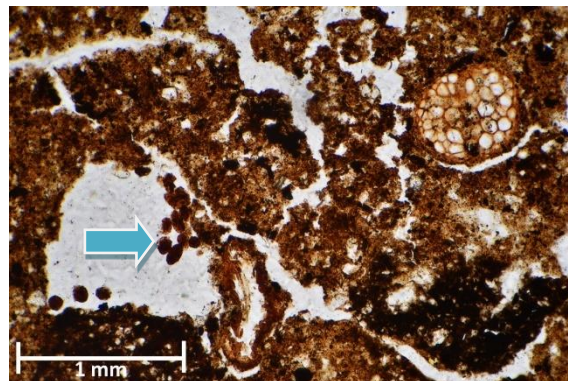


Figura 43. Rellenos de excrementos vistos en LPP (flecha azul).

## A2.10 Descripción micromorfológica del horizonte 2Ah del Umbrisol del bosque

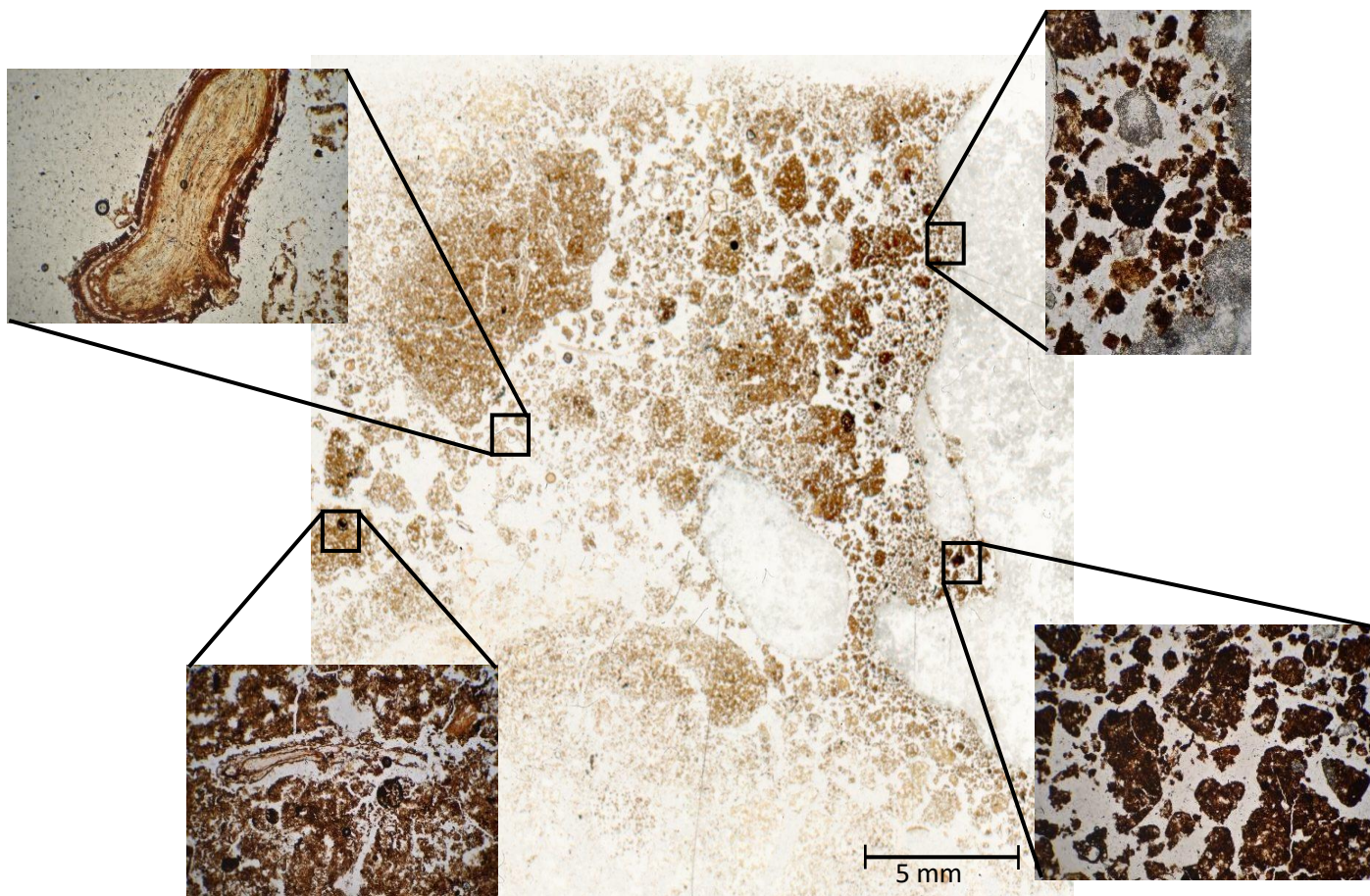


Figura 44. Sección delgada del horizonte 2Ah del Umbrisol en el bosque.

### A2.10.1 Microestructura:

Estructura pedal 100% biogénica, migajosa y granular.

#### A2.10.1.1 Agregados

Agregados granulares fuertemente desarrollados, redondeados, superficielisa de tamaño arenas medias (500-200  $\mu\text{m}$ ) y arenas finas (200-50  $\mu\text{m}$ ), frecuencia de 55%; distribución relacionada enáulica.

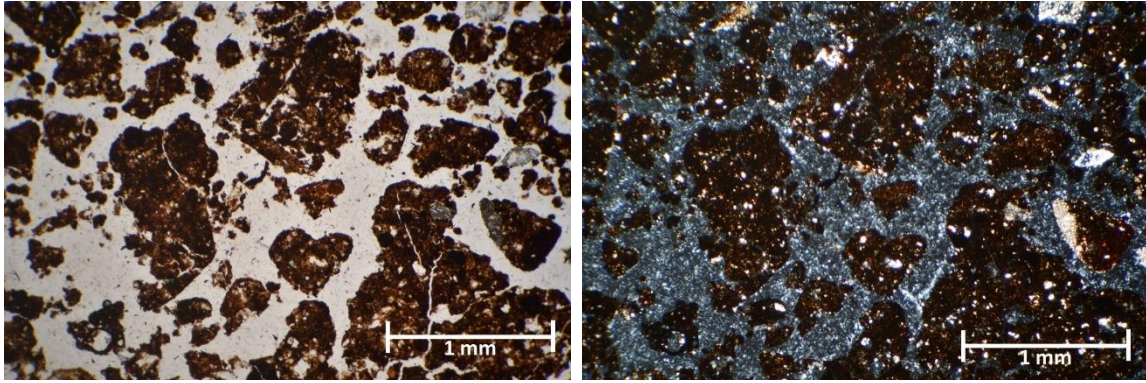


Figura 45. Agregados granulares fuertemente desarrollados; fábrica-b moteada. Izquierda LPP y derecha LPC.

### A2.10.1.2 Porosidad

Poros inter-agregados: Poros de empaquetamiento compuesto de  $\sim 30 \mu\text{m}$ , frecuencia de 35% y arreglo aleatorio.

### A2.10.2 Componentes básicos orgánicos

#### Límite g/f $10 \mu\text{m}$

#### A2.10.2.1 Fracción gruesa

Tejidos parenquimáticos de 1 mm; cilindro vascular en el centro de 0.4 mm con desmenuzamiento de  $< 2\%$  y preservación de 98%; pardos claros, opacos en LPP y muy brillantes en LPC.

Tejido parenquimático de células alargadas con desmenuzamiento de 5% y preservación de 95%; birrefringencia en la pared celular.

Tejido lignificado de  $10 \mu\text{m}$ ; desmenuzamiento de 2% y preservación de 98%; pardo claro en LPP y alta birrefringencia en todo el tejido en LPC.

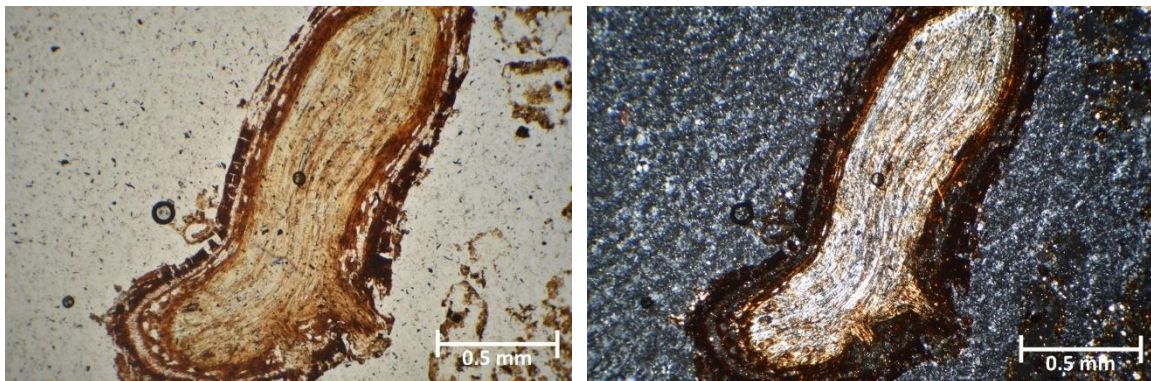


Figura 46. Tejido orgánico preservado. Izquierda LPP y derecha LPC.

### **A2.10.2.2 Material fino amorfo**

Material amorfo de superficie rugosa, opaco y frecuencia de 8%; se encuentran dentro de los agregados. Pigmentos orgánicos dentro de los agregados de tamaño 20  $\mu\text{m}$ , pardo opaco y frecuencia de 5%.

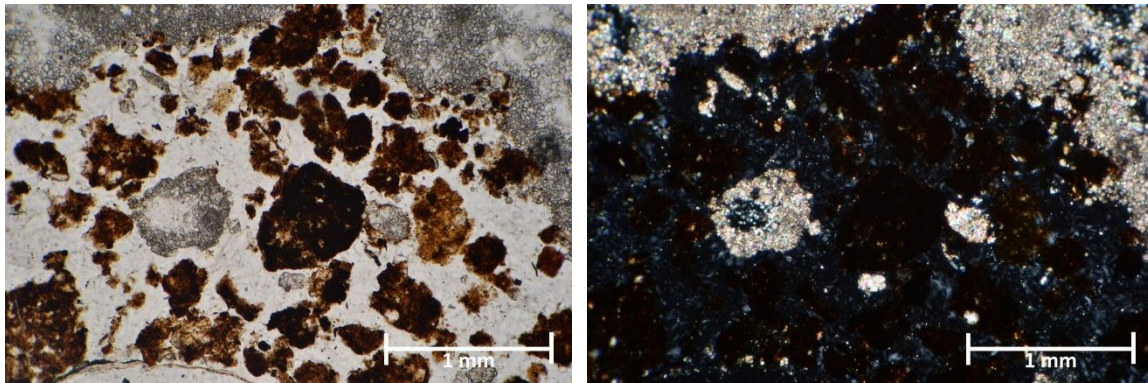


Figura 47. Agregados granulares y arenas de granos minerales. Izquierda LPP y derecha LPC.

### **A2.10.3 Componentes básicos minerales**

#### **A2.10.3.1 Granos minerales simples**

Granos anhedrales de tamaño arenas finas ( $< 100 \mu\text{m}$ ) y arenas medias ( $200-500 \mu\text{m}$ ), moderadamente ordenado con distribución aleatoria.

#### **A2.10.3.2 Masa Basal**

Fábrica-b moteada, pobremente ordenados, con patrones de distribución relacionada compleja g/f porfídica de grano simple dentro de los agregados.

### **A2.10.4 Rasgos Pedológicos**

#### **Excrementos**

Excrementos de forma elipsoidal de ácaros oribátidos, superficie moderadamente rugosa y moderadamente delgados ( $180 \times 100 \mu\text{m}$ ); frecuencia del 25%, pardos oscuros y pardos. Patrón de distribución básica agrupado y distribución relacionada mónica.

#### **A2.10.4.1 Relleno**

Relleno discontinuo del poro canal que consiste en excrementos en grupo.



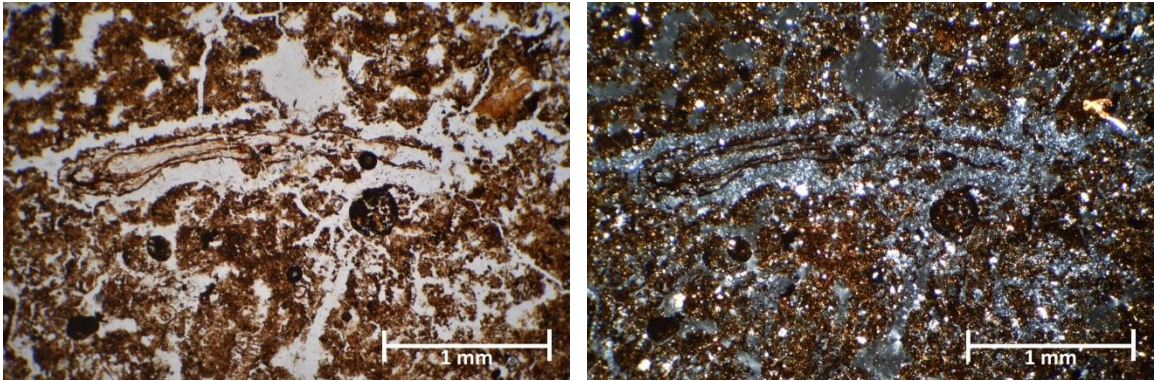


Figura 48. Agregados granulares, excretas y raíz. Izquierda LPP y derecha LPC.

## A2.11 Descripción micromorfológica del horizonte 2AB del Umbrisol del bosque

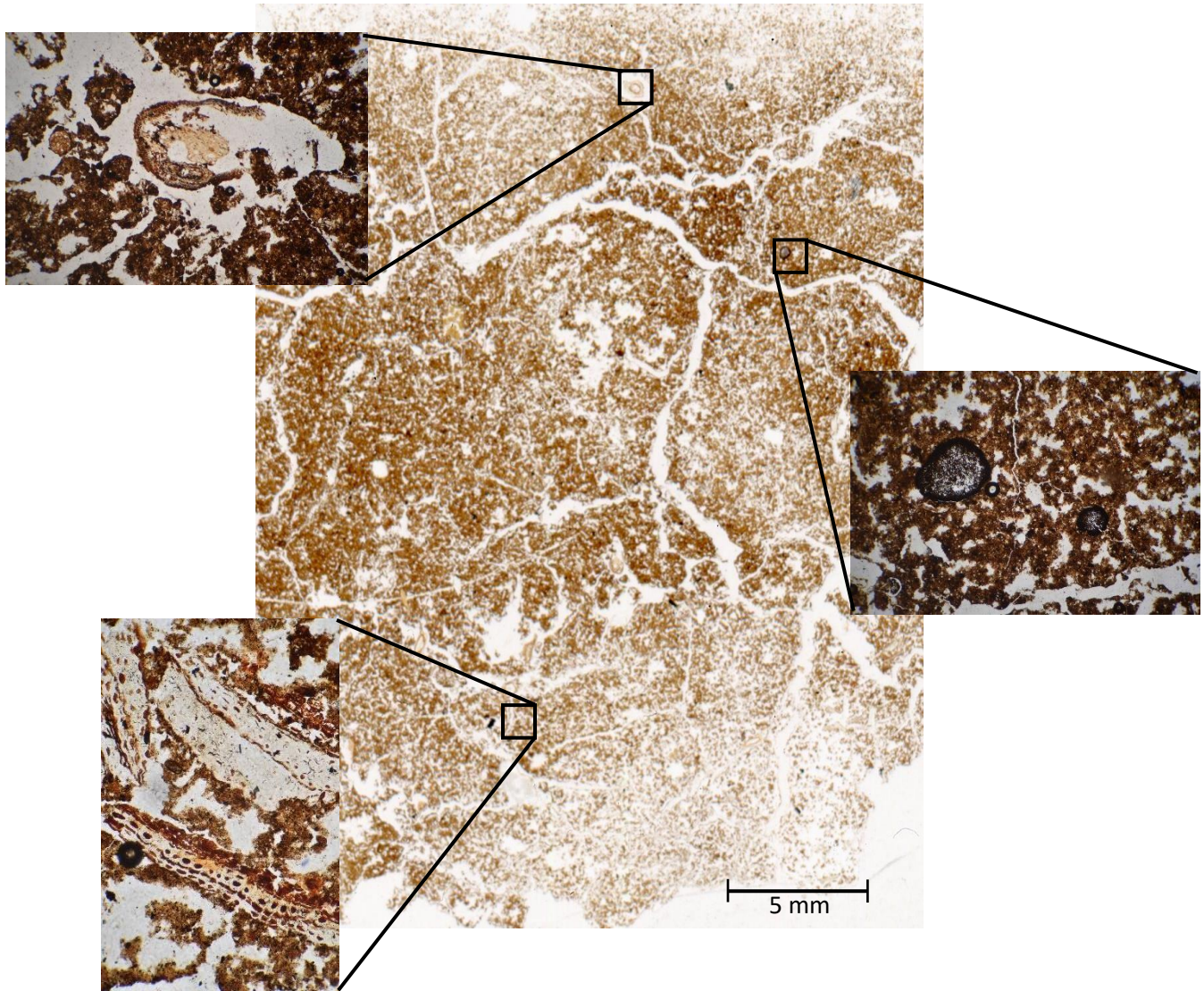


Figura 49. Sección delgada del horizonte 2AB del Umbrisol en el bosque.

### A2.11.1 Microestructura

Estructura pedal 100% biogénica en bloques subangulares que se rompen en granulares.

### A2.11.1.1 Agregados

Bloques subangulares fuertemente desarrollados, subredondeados, superficie lisa, tamaño de arenas gruesas ( $\sim 2000 \mu\text{m}$ ) y arenas medias ( $500 \mu\text{m}$ ), 70%; distribución relacionada enáulica.

Agregados granulares dentro de los bloques subangulares de moderado a fuerte desarrollo, superficie rugosa, tamaño de arenas finas ( $200\text{-}50 \mu\text{m}$ ) y limos ( $<50 \mu\text{m}$ ), 60%; distribución relacionada enáulica de agregados con microagregados.

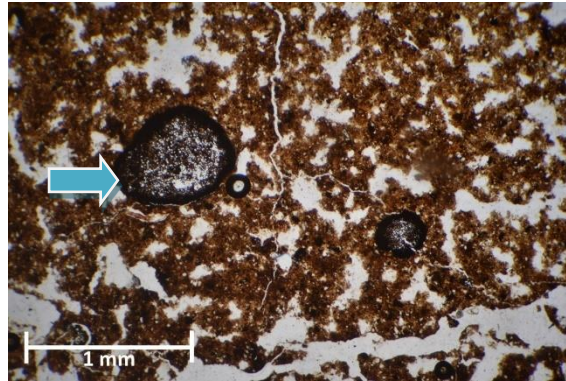


Figura 50. Agregados granulares de moderado a fuertemente desarrollados; material orgánico carbonizado (flecha azul) en LPP.

### A2.11.1.2 Porosidad

Poros inter-agregados: Poros de empaquetamiento compuesto de  $\sim 10 \mu\text{m}$ , frecuencia de 35% y arreglo aleatorio. Poros cavidad de  $<10 \mu\text{m}$ , frecuencia de 5% entre los agregados de formas redondeadas y regulares.

Poros intra-agregados: Poros cavidad de  $<10 \mu\text{m}$ , frecuencia de 5% dentro de los agregados de formas redondeadas y regulares.

### A2.11.2 Componentes básicos orgánicos

#### Límite g/f $10 \mu\text{m}$

#### A2.11.2.1 Fracción gruesa

Tejidos parenquimáticos de 1 mm que tienen un cilindro vascular de 0.4 mm con desmenuzamiento de  $<2\%$  y preservación de 98%; pardos y opaco en LPP y muy brillante en LPC.

Tejido parenquimático de células alargadas, desmenuzamiento de 40% y preservación de 60%; birrefringencia de la pared celular en LPC.

Tejido lignificado de  $10 \mu\text{m}$ , desmenuzamiento de 2% y preservación de 98%; color pardo claro.

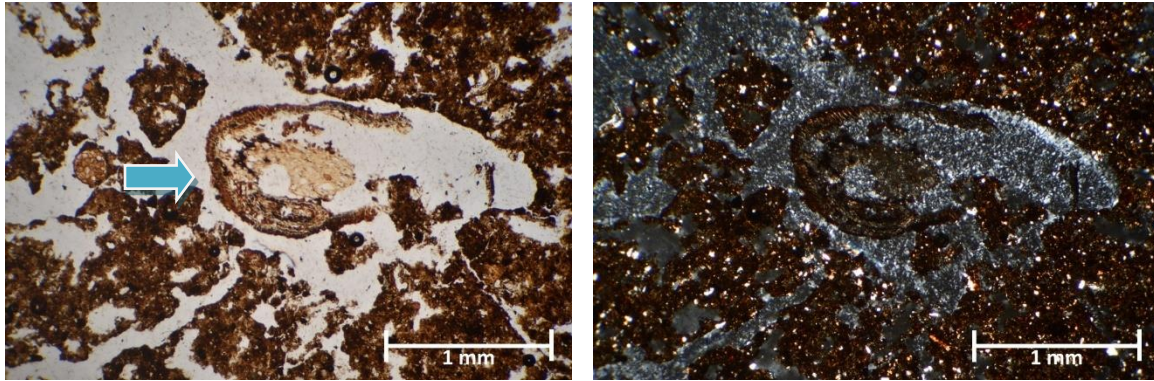


Figura 51. Agregados granulares y raíz con alto grado de desmenuzamiento (flecha azul). Izquierda LPP y derecha LPC.

### A2.11.3 Componentes básicos minerales

#### A2.11.3.1 Granos minerales simples

Granos anhedrales de tamaño arenas finas ( $< 100 \mu\text{m}$ ), moderadamente ordenado con distribución aleatoria.

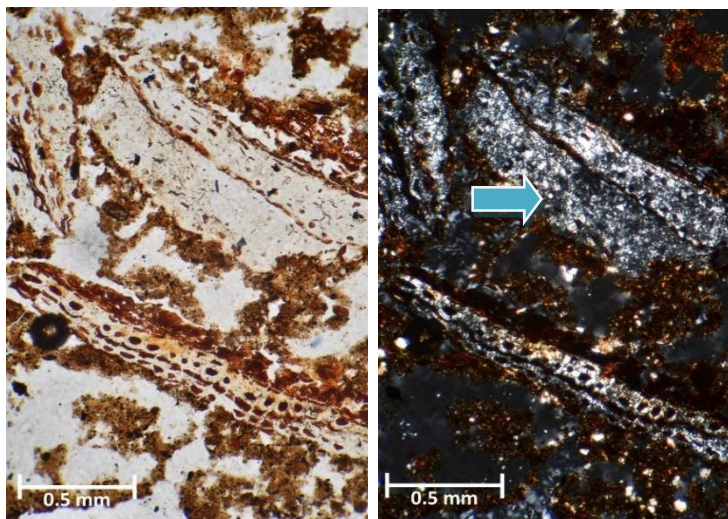


Figura 52. Tejidos orgánicos con birrefringencia (flecha azul). Izquierda LPP y derecha LPC.

#### A2.11.3.2 Masa basal

Fábrica-b moteada, pobremente ordenados, distribución relacionada compleja g/f porfídica de grano simple dentro de los agregados.

#### A2.11.4 Rasgos pedológicos excrementos

Excrementos de forma elipsoidal, superficie moderadamente rugosa y moderadamente delgados ( $180 \times 100 \mu\text{m}$ ); frecuencia de 25%, pardos oscuros y pardos; distribución básica agrupada y distribución relacionada mónica.

#### **A2.11.4.1 Relleno**

Relleno discontinuo del poro canal que consiste en excrementos en grupo.

## A2.12 Descripción micromorfológica del horizonte 2BC del Umbrisol del bosque

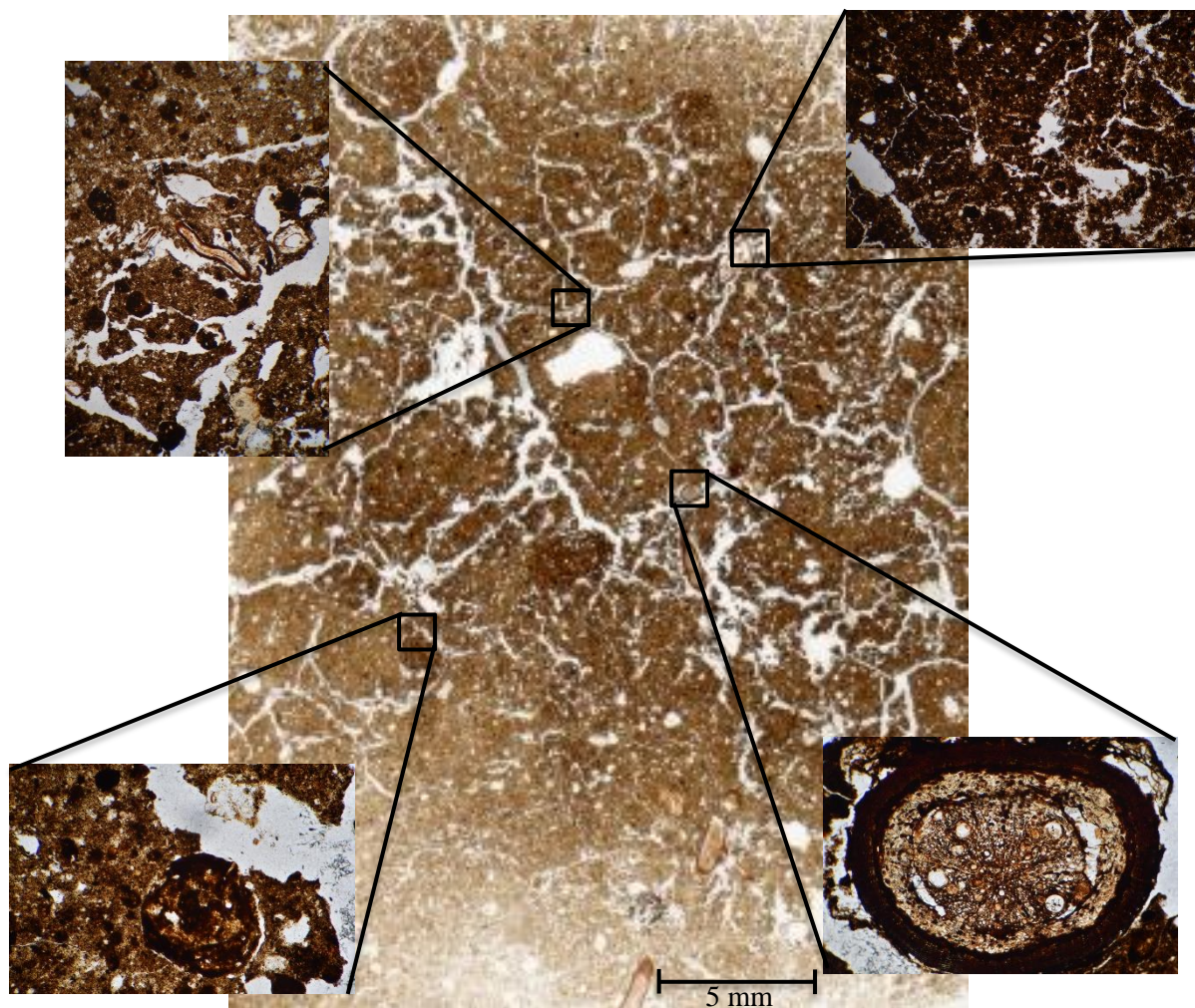


Figura 53. Sección delgada del horizonte 2BC del Umbrisol del bosque.

### A2.12.1 Microestructura

Estructura pedal 90% biogénica y 10% fisicogénica en bloques subangulares.

#### A2.12.1.1 Agregados

Bloques subangulares fuertemente desarrollados, superficie rugosa de tamaño arenas gruesas (2000-500  $\mu\text{m}$ ), medias (500-200  $\mu\text{m}$ ) y finas (<200  $\mu\text{m}$ ) de frecuencia de 50, 10 y 10% respectivamente; distribución relacionada enáulica de agregados con microagregados.

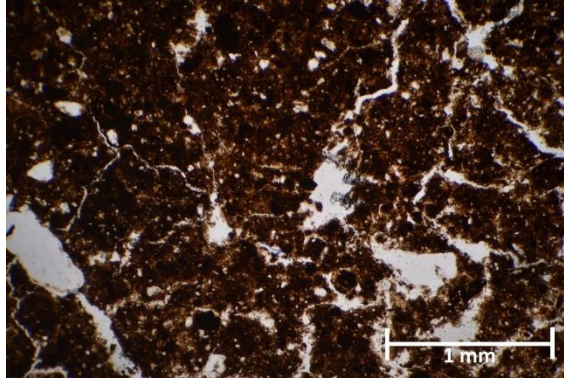


Figura 54. Bloques subangulares moderadamente desarrollados en LPP.

### A2.12.1.2 Porosidad

Poros inter-agregados: Poros de empaquetamiento compuesto de  $\sim 10 \mu\text{m}$  con frecuencia de 30% y arreglo aleatorio.

Poros intra-agregados: Poros en fisuras de  $< 10 \mu\text{m}$  con frecuencia de 5% dentro de los agregados en zigzag.

### A2.12.2 Componentes básicos orgánicos

#### Límite g/f $10 \mu\text{m}$

#### A2.12. 2.1 Fracción gruesa

Tejidos parenquimáticos de 1 mm; cilindro vascular en el centro de 0.3 mm, desmenuzamiento de  $< 2\%$  y preservación de 98%; pardo claro, opaco en LPP y muy brillante en LPC.

Tejido parenquimático de células alargadas con desmenuzamiento de 40% y preservación de 60%.

Tejido lignificado de grosor de  $10 \mu\text{m}$ , desmenuzamiento de 2% y preservación de 98% debido a alta birrefringencia en todo el tejido; color pardo claro.

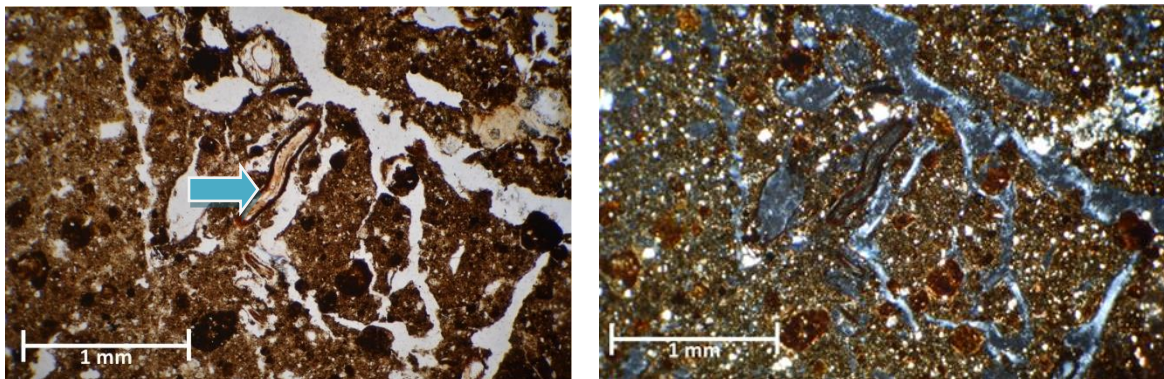


Figura 55. Agregados en bloques subangulares con raíces (flecha azul). Izquierda LPP y derecha LPC.

### A2.12.3 Componentes básicos minerales

#### A2.12.3.1 Granos minerales simple

Granos anhedrales de tamaño arenas finas ( $< 100 \mu\text{m}$ ), moderadamente ordenados con distribución aleatoria.

#### A2.12.3.2 Masa basal

Fábrica-b indiferenciada, pobremente ordenados, con patrones de distribución relacionada compleja g/f porfídica de grano simple dentro de los agregados.

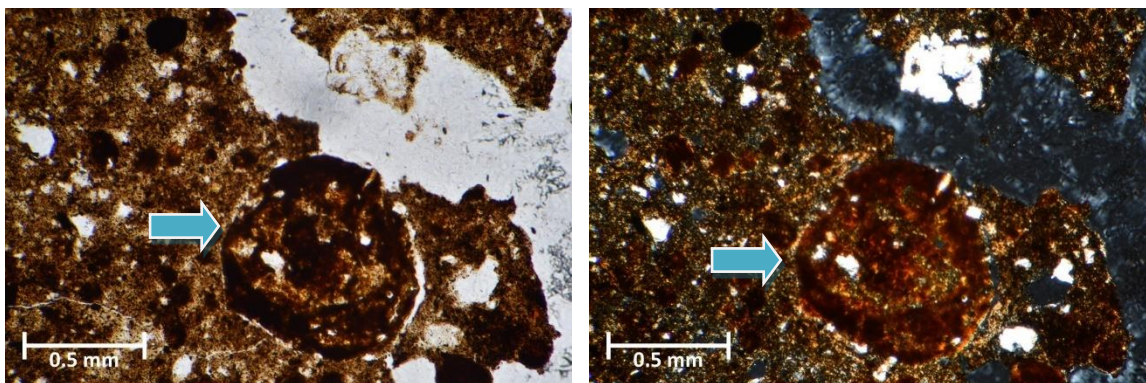


Figura 56. Nódulo de Fe (flecha azul). Izquierda LPP y derecha LPC.

### A2.12.4 Rasgos pedológicos

#### Excrementos

Excrementos elipsoidales de ácaros oribátidos, superficie moderadamente rugosa y moderadamente delgados ( $180 \times 100 \mu\text{m}$ ), frecuencia de 25%; pardos oscuros y pardos; patrón de distribución agrupado y distribución relacionada mónica.

#### A2.12.4.1 Relleno

Relleno discontinuo del poro canal que consiste en excrementos en grupo.

#### A2.12.4.2 Amorfos

Se observan algunos nódulos de Fe dentro de los agregados, agrupados con límite claro y frecuencia de 10 %.



## 6. Bibliografía

Almendros, G., y González-Vila, F. J. (1987). Degradative studies on a soil humin fraction—sequential degradation of inherited humin. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(5), 513-520.

Álvarez-Arteaga, G., García-Calderón, N.E., Krasilnikov, P.V., Sedov, S.N., Targulian, V.O., Velázquez Rosas, N. (2008). Soil altitudinal sequence on base-poor parent material in a montane cloud forest in Sierra Juárez, Southern Mexico. *Geoderma*, 144, 593–612.

Álvarez-Arteaga, G., García Calderón, N. E., Krasilnikov, P., y García-Oliva, F. (2013). Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla de la sierra norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 47(2), 171-180.

Amézketa, E. (1999). Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(2–3), 83– 151.

An, S., Mentler, A., Mayer, H., y Blum, W. E. H. (2010). Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. *Catena*, 81(3), 226–233

Anaya, C. A., Mendoza, M., Rivera, M., Páez, R. y Olivares- Martínez, L. D. (2016). Contenido de carbono orgánico y retención de agua en suelos. *Agrociencia*, 50(2), 251-269.

Armstrong, A. S. B., y Tanton, T. W. (1992). Gypsum applications to aggregated saline—sodic clay topsoils. *Journal of Soil Science*, 43(2), 249-260.

Attou, F., Bruand, A., y Le Bissonnais, Y. (1998). Effect of clay content and silt–clay fabric on stability of artificial aggregates. *European Journal of Soil Science* 49, 569–577.

Ayoubi, S., Mokhtari Karchegani, P., Mosaddeghi, M. R. y Honarjoo, N. (2012). Soil aggregation and organic carbon as affected by topography and land use change in western Iran. *Soil and Tillage Research*, 121, 18–26.

Bautista-Cruz, A., y del Castillo, R.F. (2005). Soil changes during secondary succession in a tropical montane cloud forest area. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 906–914.

Bockheim, J. G., y Gennadiyev, A. N. (2000). The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. *Geoderma*, 95(1-2), 53-72.

Bronick, C. J. y Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22.

Bruijzeel, L. A. y Proctor, J. (1995). Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forests: ¿what do we really know? In tropical Mountane Cloud Forests, eds. Hamilton, L.S, Juvik, J. y Scartena, F.N., pp 38-78. New York: Springer-Verlag.

- Bruijnzeel, L.A. y Veneklaas, E.J., (1998). Climatic conditions and tropical montane forest productivity: The fog has not lifted yet. *Ecology* 79, 3–9.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., & Tursina, T. (1985). Handbook for soil thin section description. Waine Research.
- Carrasco, B. (1970). La Formación El Abra (Formación el Doctor) en la Plataforma Valles-San Luis Potosí. *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo*, 97.
- Cartujano, S., Zamudio, S., Alcantara, O. y Luna, I. (2012). El bosque mesófilo de montaña en el municipio de Landa de Matamoros, Querétaro, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 70, 13-43.
- Challenger, A. y Caballero, J. (1998). Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México: Pasado, Presente y Futuro. CONABIO. Instituto de Biología. Sierra Madre, México, D. F.
- Challenger, A. y Soberón, J. (2008). *Los ecosistemas terrestres, Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO, México.
- Christensen, B.T. (1992) Fraccionamiento físico del suelo y la materia orgánica en partículas primarias y densidades separadas. En: Stewart BA (eds) *Advances in Soil Science*. vol 20. pp 2-76, Springer, Nueva York, NY
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2011). Inventario nacional forestal y de suelos: Manual y procedimientos para el muestreo de campo Re-muestreo.
- CONABIO (2010). El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México D.F., México.
- Díaz-Zorita, M., Perfect, E. y Grove, J.H. (2002). Disruptive methods for assessing soil structure. *Soil and Tillage Research*, 64, 3-22.
- DiDonato, N., Chen, H., Waggoner, D., y Hatcher, P.G. (2016). Potential origin and formation for molecular components of humic acids in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 178, 210-222.
- Dorransoro, C., Alonso Rojo, P., & Rodriguez Rebollo, T. (1988). Hydromorphy and its micromorphological features. *Anuales de Edafología y Agrobiología* (Spain).
- Duchaufour, P. (1984). *Edafología. Edafogénesis y clasificación* (1º ed., vol. 1) Masson, S. A., Barcelona.
- dos Reis Ferreira, C., do Nascimento Guedes, J., Rosset, J. S., dos Anjos, L. H. C., y Pereira, M. G. (2019). Diversity of the edaphic macrofauna in areas managed under no-tillage for different periods. *Semina: Ciências Agrárias*, 40(2), 599-610.

- Ferreira, C. dos R., Silva Neto, E. C. da, Pereira, M. G., Guedes, J. do N., Rosset, J. S., y Anjos, L. H. C. dos. (2020). Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. *Soil and Tillage Research*, 198, 104-133.
- FitzPatrick, E.A. (1984). Micromorphology of soils. Chapman & Hall, New York.
- Ghabbour, E. A., y Davies, G. (2001). *Humic Substances Structures, Models and Functions*. E. A. Ghabbour y G. Davies, (Eds.). Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry.
- Ghezzehei, T. A. (2012). *Soil structure. Handbook of soil science*. 2, 1-17.
- Grubb, P. J (1977). Control of forest growth and distribution on wet tropical mountains: with special reference to mineral nutrition. *Annual Review of Ecology and Systematics*., 8, 83-107
- Haynes, R. J., y Swift, R.S. (1990). Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *Journal of Soil Science*, 41, 73–83.
- Iuss Working Group Wrb. (2015) Base de referencia mundial para los recursos del suelo 2014, actualización 2015: Sistema internacional de clasificación de suelos para nombrar suelos y crear leyendas para mapas de suelos. World Soil Resources Reports No. 106, 192.
- Kay, B.D., Silva, A.P., Baldock, J.A. (1997). Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedotransfer functions. *Canadian Journal of Soil Science*, 77, 655–667.
- Kemper, W.D. y Rosenau, R.C., (1986). Aggregate stability and size distribution. En: Klute, (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1- Physical and Mineralogical Methods* (pp. 425-442) Soil Science Society of America Journal.
- Kowalska, J. B., Zaleski, T., Józefowska, A., y Mazurek, R. (2019). Soil formation on calcium carbonate-rich parent material in the outer Carpathian Mountains—A case study. *Catena*, 174, 436-451.
- Krasilnikov, P. V., Calderón, N. G., Sedov, S. N., Gómez, E. V., y Bello, R. R. (2005). The relationship between pedogenic and geomorphic processes in mountainous tropical forested area in Sierra Madre del Sur, Mexico. *Catena*, 62(1), 14-44.
- Krasilnikov, P., García-Calderón, N., y Pogosyan, L. (2016). Polygenetic soils of montane cloud forest in Sierra Gorda, Mexico. *Geoderma Regional*, 7(4), 366-375.
- Krull, E.S., Skjemstad, J.O., y Baldock, J.A., (2004). Functions of soil organic matter and the effects on soil properties. GRDC Australia Project No CSO 00029. ACT, Canberra. pp 129.
- Leuschner, Ch., Moser, g., Berstch, C., Röderstein, M., y Hertel, D. (2007). Large altitudinal

increase in tree root/shoot ratio in tropical mountain forests of Ecuador. *Basic and Applied Ecology*, (8), 219-230.

Li, N., Long, J., Han, X., Yuan, Y., & Sheng, M. (2020). Molecular characterization of soil organic carbon in water-stable aggregate fractions during the early pedogenesis from parent material of Mollisols. *Journal of Soils and Sediments*, 20(4), 1869-1880.

LiuSui, Y., Zhu, X., Li, D., Yan, C., Sun, T., y Jia, H. (2019). Soil aggregate and intra-aggregate carbon fractions associated with vegetation succession in an alpine wetland of Northwest China. *Catena*, 181, 104107.

Loveless, A. R. (1961). A nutritional interpretation of sclerophylly based on differences in the chemical composition of sclerophyllusand mesophytic Leaves. *Annals of Botany*, 25, 164-184.

Lützwow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., y Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions- a review. *European Journal of Soil Science*. 57, 426–445.

McDowell, W., y Asbury, C. (1994). Export of carbon, nitrogen, and major ions from three tropical montane watersheds. *Limnology and Oceanography*, 39, 614-624.

Mendoza-Vega, J., Karlton, E., y Olsson, M. (2003). Estimations of amounts of soil organic carbon and fine root carbon in land use and land cover classes, and soil types of Chiapas highlands, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 177(1-3), 191-206.

Montagne, D., Cornu, S., Le Forestier, L., y Cousin, I. (2009). Soil drainage as an active agent of recent soil evolution: a review. *Pedosphere*, 19(1), 1-13.

Murphy, C.P. (1986). Thin section preparation of soils and sediments. A.B. Academic Publishers, Berkhamsted.

Oades, J.M. (1984). Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76, 319–337.

Oades, J. M. (1988). The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry*, 5(1), 35-70.

Pulleman, M.M., Six, J., Van Breemen, N., Jongmans, A.G., (2005). Soil organic matter distribution and microaggregate characteristics as affected by agricultural management and earthworm activity. *European Journal of Soil Science*, 56(4), 453–467.

Quinn, G., y Keough, M. (2002). Experimental Design and Data Analysis for Biologists. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.

Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S. y Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122–137.

- Rosas-Rangel, D. M., Mendoza, M. E., Gómez-Tagle, A. y Tobón-Marín, C. (2019). Avances y desafíos en el conocimiento de los bosques mesófilos de montaña de México. *Madera y Bosques*, 25(1), 1–19.
- Rzedowski J. (1996). Análisis preliminar de la flora vascular de los bosques mesófilos de montaña de México. *Acta Botánica Mexicana* 35, 25-44
- Rzedowski, J. (2006). Bosque mesófilo de montaña 1era Edición digital, Capítulo 18, pp. 328-339. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Schweizer, S. A., Mueller, C. W., Höschen, C., Ivanov, P., y Kögel-Knabner, I. (2021). The role of clay content and mineral surface area for soil organic carbon storage in an arable toposequence. *Biogeochemistry*, 1-20.
- Siebe C., Jahn R. y Stahr K. (2006). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo. Instituto de Geología. 2ª ed. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Six, J., Elliott, E. T., Paustian, K., y Doran, J. W. (1998). Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 62(5), 1367–1377.
- Six, J., Elliott, E. T. y Paustian, K. (2000). Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(14), 2099–2103.
- Six, J., Paustian, E. T., y Combrink, C. (2000). Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2), 681–689.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., y Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and soil*, 241(2), 155-176.
- Six, J., y Paustian, K. (2014). Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, A4.
- Soil Survey Staff. 2014. Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Stoops, G. (2003). Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Strawn, D.G., Bohn, H. L., y O'Connor, G.A. (2015). Soil Chemistry. Wiley Blackwell, Chichester.
- Sutton, R., y Sposito, G. (2006). Molecular simulation of humic substance–Ca-montmorillonite complexes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(14), 3566-3581.

- Swift, R. S. (1996). Organic Matter Characterization. En: Sparks, D. L. (Ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 3- Chemical Methods*. (pp. 1036-1059) Soil Science Society of America Journal.
- Tisdall, J. M., y Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal Soil Science*, 33, 141-143.
- Tisdall, J.M. (1996). Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. En: Carter, M.R., Stewart, B.A. (Eds.), *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 57–96.
- Theng, B.K.G. (2012). Humic substances. *Developments in Clay Science (Vol.4)*. Elsevier.
- Van Reewick, L. P. (2002). *Procedures for soil analysis*. International Soil Reference and Information Center. 6a ed. Wageningen, The Netherlands.
- Velásquez, E., Pelosi, C., Brunet, D., Grimaldi, M., Martins, M., Rendeiro, A.C., Barrios, E., Lavelle, P. (2007). This ped is my ped: visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. *Pedobiology* (51), 75–87.
- Veneman, P. L., Vepraskas, M. J., y Bouma, J. (1976). The physical significance of soil mottling in a Wisconsin toposequence. *Geoderma*, 15(2), 103-118.
- Verchot, L.V., Dutaur, L., Shepherd, K. D., y Albrecht, A. (2011). Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils. *Geoderma*, 161(3–4), 182–193.
- Watteau, F., Jangorzo, N. S., y Schwartz, C. (2019). Análisis micromorfológico para cuantificar descriptores estructurales en un tecnosol construido reciente. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 71(1), 11-20.
- Webster, R. y Oliver, M.A., (1990). *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey*.: Oxford University Press, Nueva York, Estados Unidos.
- Yang, W., Zhao, H., Leng, X., Cheng, X., y An, S., (2017). Soil organic carbon and nitrogen dynamics following, *Spartina alterniflora*, invasion in a coastal wetland of eastern China. *Catena* 156, 281–289.
- Zamudio Ruiz, S., y Rzedowski Rotter, J. (1992). La Vegetación del estado de Querétaro: panorama preliminar (No. JRZ-18).
- Zanella, A., Jabiol, B., Ponge, J. F., Sartori, G., De Waal, R., Van Delft, B., ... y Englisch, M. (2011). A European morpho-functional classification of humus forms. *Geoderma*, 164(3-4), 138-145.
- Zhang, J. B., Song, C. C., y Wang, S. M., (2007). Dynamics of soil organic carbon and its fractions after abandonment of cultivated wetlands in northeast China. *Soil Tillage Research*. 96 (1–2), 350–360.