

El papel de los hongos en la conservación de Andosols: estudio de caso en Tlaxcala, México

The role of fungi in the conservation of Andosols: case study in Tlaxcala México

Arturo Jiménez Martínez¹, Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena^{1 ‡},
Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena², Alejandro Alarcón³,
Mayra Elena Gavito Pardo⁴ y Noé Manuel Montaña Árias⁵

¹ Programa en Edafología, Área de Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos, ³ Área de Microbiología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

[‡] Autora para correspondencia (castor@colpos.mx)

² Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Francisco I. Madero s/n, Ex Hacienda el Cañada. 66050 Cd. Gral. Escobedo, N.L., México.

⁴ Laboratorio de Interacción Planta-Microbio-Ambiente. Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, UNAM Campus Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro No.8701 Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta. 58190 Morelia, Michoacán, México.

⁵ Departamento de Biología Botánica Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. Av. San Rafael Atlixco 186, Leyes de Reforma 1ra. Secc. 09340 Ciudad de México, México.

RESUMEN

El estado de Tlaxcala, México, presenta problemas ambientales relacionados con la erosión del suelo; sin embargo, en algunas áreas conformadas por Andosols, bosque de pino y zonas agrícolas, su degradación es mínima. La presencia de micelio abundante en los horizontes subsuperficiales en suelos localizados en pendiente puede ser causa que los suelos se conserven. Los objetivos del estudio fueron caracterizar las propiedades edáficas de suelos en diferente posición geomorfológica, identificar especies de hongos micorrízico arbusculares (HMA) y determinar la relación del micelio con los agregados y las partículas elementales en un Vitric Andosols de Calpulalpan, Tlaxcala, México. Los resultados muestran que los suelos presentaron diferentes secuencias y espesores de cenizas y lapillis pomáceos, de moderada a alta fertilidad. La estructura migajosa dominó en horizontes superiores y granular simple en sub-horizontes. Los horizontes presentaron retención alta de humedad y permeabilidad facilitando el desarrollo micelial y formación de esporas de HMA hasta 120 cm de profundidad. Se registraron 10 especies de HMA y la más abundante fue *Funneliformis mosseae*. El análisis micro-morfológico mostró diferentes relaciones entre el micelio, los horizontes y las partículas del suelo, con residuos orgánicos (horizonte O), macro y micro

agregados (horizontes A y B), alófano e imogolita (horizonte B) y lapillis (horizonte C). El micelio de los hongos formó redes en todo el suelo y en los lapillis inserta a las partículas de pómez (como cuentas de rosario) a través de los poros vesiculares tubulares lo que le proporciona estabilidad a los Andosols y evita su degradación.

Palabras clave: *Vitric Andosols, lapillis pomáceos, micromorfología, hongos micorrízicos.*

SUMMARY

Tlaxcala state, Mexico, show environmental problems related to soil erosion; however, in some areas of Andosols, with pine forests and even in agricultural areas, it has been observed that their degradation is minimal. The abundant presence of mycelium even in subsurface horizons can be the reason why soils are conserved. The objectives of this study were to characterize the edaphic properties in different geomorphological positions, to identify the species of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and to determine the relationship of the mycelium with aggregates and elementary particles in a Vitric Andosols of Calpulalpan, Tlaxcala, Mexico. The results showed that soils have different sequences and thicknesses of ashes and lapillis pomaceous and have moderate

Cita recomendada:

Jiménez Martínez, A., M. C. Gutiérrez Castorena, E. Vladimir Gutiérrez Castorena, A. Alarcón, M. E. Gavito Pardo y N. M. Montaña Árias. 2019. El papel de los hongos en la conservación de Andosols: estudio de caso en Tlaxcala, México. *Terra Latinoamericana* 37: 93-103.
DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.437>

Recibido: 24 de junio de 2018.

Aceptado: 18 de diciembre de 2018.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 37: 93-103.

to high fertility. The crumbly structure dominated in upper horizons and simple granular in sub-horizons. The horizons showed high retention of humidity and permeability facilitating mycelial development and formation of AMF spores up to 120 cm deep. Ten species of AMF were recorded and the most abundant was *Funneliformis mosseae*. The micro-morphological analysis showed different relationships between the mycelium, horizon and soil particles, with organic waste (horizon O), with macro and micro aggregates (horizons A and B), with allophane and imogolite (horizons B) and lapillis (horizon C). The fungal mycelium forms networks throughout the soil, and in the lapillis it inserts the pumice particles (like a rosary) through the tubular vesicular pores, which provides stability to the Andosols and prevents their degradation.

Index words: *Vitric Andosols, pomaceous lapillis, micromorphology, mycorrhizal fungi.*

INTRODUCCIÓN

Los Andosols son suelos que poseen alta capacidad de retención de agua, buen drenaje, friables, forman agregados estables de forma natural, además de tener una baja densidad aparente y una alta porosidad (IUSS grupo de trabajo de la WRB, 2015). Sin embargo, la remoción de la vegetación conduce a escorrentía y erosión severa (McDaniel *et al.*, 2012), que permite el afloramiento de los materiales parentales (Krasilnikov *et al.*, 2013).

En Tlaxcala, México, uno de sus principales problemas ambientales se relaciona con la degradación de suelo, la cual representa hasta 76.8% de su superficie (SEMARNAT-CP, 2002¹). Sin embargo, en el municipio de Calpulalpan, Gutiérrez del Valle (2014²) detectó zonas estables de Andosols con bosque de pino/encino (8058 ha), a pesar de que se desarrollaron a partir de cenizas y lapillis pomáceos e impacto humano a través de la construcción de caminos. Un rasgo común de estos suelos es la presencia de abundantes hifas y esclerocios que contribuyen en la agregación del suelo (Sedov *et al.*, 2010). Empero, no se ha reportado cuál es el papel que pueden tener estas estructuras fúngicas en materiales pomáceos y en la estabilidad del sistema para evitar la degradación de los Andosols.

Los agregados de suelo son unidades estructurales entre partículas elementales (arcillas, limos y arenas), que se constituyen como producto de la interacción entre procesos físicos, químicos y biológicos (Kasper *et al.*, 2009). Éstos se agrupan por su tamaño en macroagregados > 250 μm y microagregados < 250 μm (Borie *et al.*, 2008). La teoría jerárquica de la agregación propuesta por Tisdall y Oades (1982), plantea que los microagregados se unen para formar macroagregados, donde los enlaces químicos de aluminosilicatos se enlazan entre sí para formar microagregados. Este proceso también obedece a una jerarquía sucesiva de organización biológica donde las comunidades fúngicas, en particular las que forman ectomicorrizas o endomicorrizas y las raíces, juegan un papel importante en el enlace entre partículas (Six *et al.*, 2004). Además, las propiedades microclimáticas (humedad y aireación), así como el continuo aporte de materia orgánica, son también importantes en estas interacciones (Bedini *et al.*, 2009). No obstante, todavía es un reto entender las interacciones entre los microorganismos y agregados (Nie *et al.*, 2014). En Andosols existe una clara necesidad de mejorar la comprensión de los procesos que controlan la dinámica de su formación y el papel del micelio (Sedov *et al.*, 2010).

Los objetivos del presente estudio fue caracterizar las propiedades edáficas que favorecen la habilidad radical y el crecimiento de los hongos, identificar las especies de hongos micorrízico arbusculares y determinar la relación de los hongos con diferentes componentes del suelo a nivel de sección delgada en Andosols de Calpulalpan, Tlaxcala, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio se localiza en la localidad de San Felipe en un área de bosque de pino en Calpulalpan Tlaxcala, México, ubicado en las coordenadas 19° 32' 11.9" N, 98° 39' 12.3" O, a una altitud de 2664 m (Figura 1). El clima es templado subhúmedo con una temperatura promedio de 13.6 °C y una precipitación anual de 655 mm (INEGI, 2018). El material parental son cenizas volcánicas y lapillis pomáceos con

¹ SEMARNAT-CP. 2002. Evaluación de la degradación de suelo causada por el hombre en la República Mexicana. Escala 1:50 000. Memoria Nacional. 68 pp.

² Gutiérrez del Valle, A. 2014. Erosión hídrica del estado de Tlaxcala. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Programa de Edafología. COLPOS, Campus Montecillo. Montecillo, Estado de México. 62 pp.

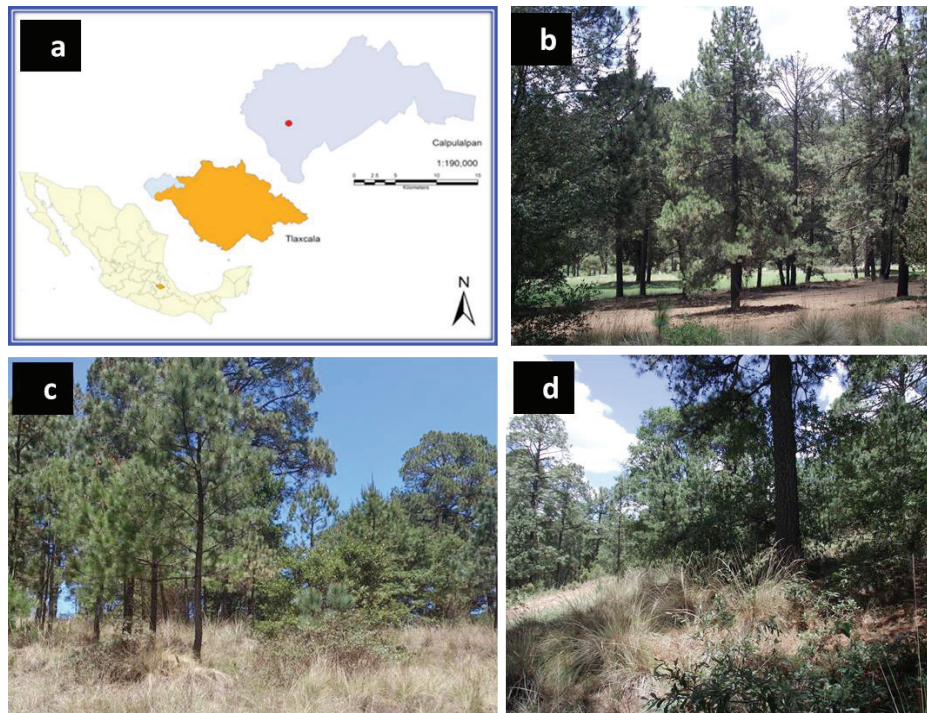


Figura 1. a) Zona de estudio; b) suelo agrícola; c) bosque de pino/pastizal; d) bosque de pino en Calpulalpan, Tlaxcala, México.
Figure 1. a) Study area; b) agricultural land; c) pine forest/pasture; d) pine forest in Calpulalpan, Tlaxcala, Mexico.

diferentes secuencias y espesores. La vegetación corresponde a bosque de pino Ocoté (*Pinus patula* Schl. *et* Cham), asociados con pastizales o con cultivos principalmente de maíz (*Zea mays* L.). Los suelos se clasifican como Vitric Andosols de acuerdo con el IUSS grupo de trabajo de la WRB (2015).

Fase de Campo

Después de recorridos de campo se seleccionaron tres sitios, los cuales varían en geomorfología, material parental (cenizas volcánicas Cv y lapillis La) y pinos con diferentes asociaciones: Sitio 1 (pendiente alta, con cultivo de maíz y Cv); Sitio 2 (pendiente media; con pastizales y Cv/La); y Sitio 3 (pendiente baja, pino natural y Cv/La). En cada sitio se excavó un pozo pedológico y se describieron los perfiles de suelos con base en el Manual de Cuanalo (1982). La abundancia de micelio se determinó cuantificando el número de hifas por dm^2 en cada horizonte y usando la misma escala para las raíces: 0-5 raras, 5 a 10 pocas, 10-50 comunes, 50-100 abundantes; y > 500 muy abundantes. La habilidad radical se evaluó con base en las propiedades

edáficas (textura y estructura) según la propuesta de Pape y Lagger (1995).

Posteriormente, se colectaron muestras alteradas (análisis de laboratorio) e inalteradas (análisis micromorfológico) una por cada horizonte identificado en campo, dando un total de 15 muestras de suelo. En la identificación de esporas de HMA se utilizó una muestra compuesta, integrada por cinco submuestras, las cuales fueron colectadas de manera aleatoria en el horizonte superficial de los suelos estudiados a una profundidad de 0-20 cm. Todo el muestreo de campo se realizó durante el verano de 2014.

Análisis de Laboratorio

Los análisis físicos y químicos realizados fueron: densidad aparente (terron parafinado), pH (relación agua-suelo 2:1), capacidad de intercambio catiónico (acetato de amonio), cationes intercambiables Na^+ , K^+ (flamometría), Ca^{++} , Mg^{++} (absorción atómica), fósforo soluble (Bray y Olsen según pH), N_{Tot} (Kjeldahl) y materia orgánica (Walkley y Black, 1934). Las metodologías fueron extraídas del manual de Van Reeuwijk (2002).

Aislamiento, Cuantificación, Identificación y Abundancia de Especies de HMA

Para la extracción de las esporas de hongos micorrízico arbusculares (HMA), se utilizó la metodología de tamizado y decantación propuesta por Gerdemann y Nicolson (1963), seguida de la separación en un gradiente de sacarosa al 60%. La determinación taxonómica de las especies de HMA se realizó mediante características morfológicas observadas y reportadas por IBG (1993). Asimismo, se calculó el índice de dominancia de especies (Índice de Simpson), lo que indicó la riqueza y variación de especies del sitio estudiado.

Análisis Micromorfológico

Las muestras inalteradas se secaron a temperatura ambiente bajo sombra y se impregnaron con una mezcla de resina poliéster insaturada y monómero

de estireno en una relación 70:30. Cada bloque inalterado se cortó de manera vertical y se elaboró una sección delgada ($5 \times 7.5 \text{ cm} \times 30 \mu\text{m}$), con base en la metodología propuesta por Murphy (1986). Los diferentes componentes del suelo (materia orgánica gruesa, fina e inorgánicos), así como su agregación y porosidad se describieron utilizando un microscopio petrográfico y la terminología de Bullock *et al.* (1985) y Stoops (2003). Dentro de la fracción fina de la materia orgánica se describió el micelio y las esporas, su patrón de distribución y relación con los componentes del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se reportan los perfiles estudiados y las diferentes secuencias de Cv y La. Asimismo, en la Figura 3, se puede apreciar la distribución de las raíces entre horizontes de los diferentes perfiles y con abundante micelio, sobre todo en los suelos que se ubican en pendientes media y baja, en donde las hifas

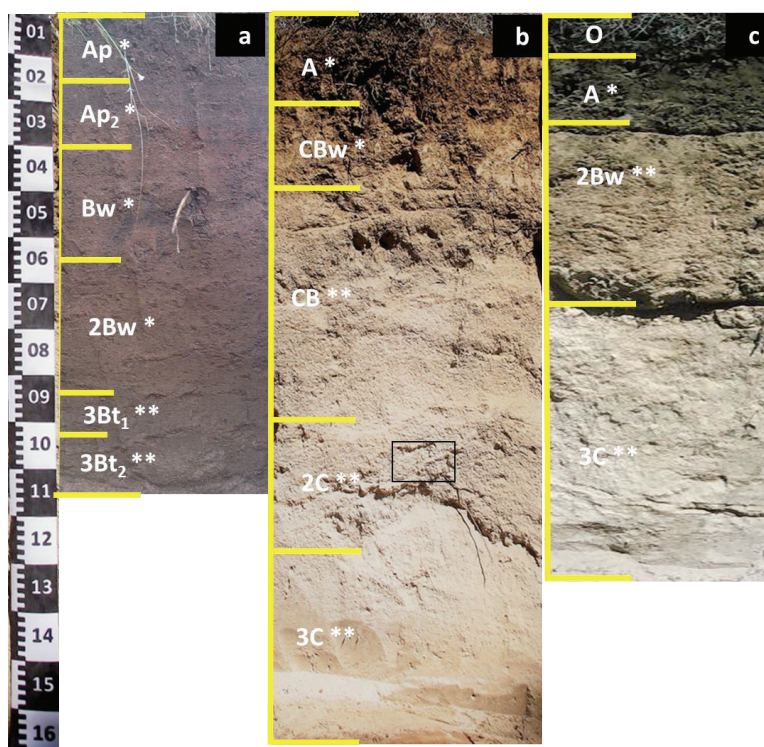


Figura 2. Perfiles de suelos de acuerdo con su posición geomorgológica y material parental. a) pendiente alta; b) pendiente media; c) pendiente baja. Vitric Andosol de Calpulalpan, Tlaxcala. * Ceniza volcánica, **lapillis.

Figure 2. Soil profiles according to their geomorgological position and parental material. a) high slope; b) medium slope; c) low slope. Vitric Andosol from Calpulalpan, Tlaxcala. * Volcanic ash, ** lapillis.

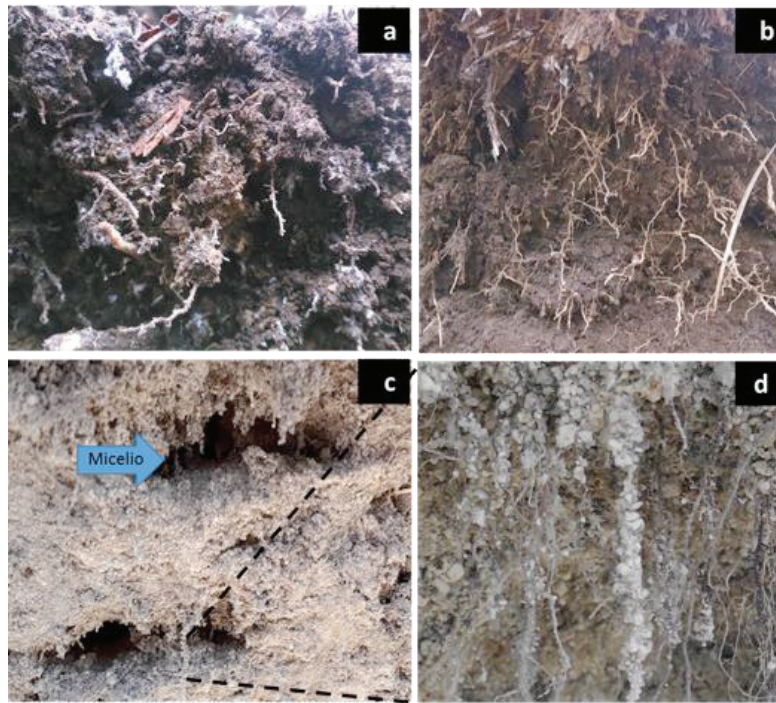


Figura 3. Interacción radical con agregados en horizontes de diferentes perfiles.

a) horizonte O en bosque de pino (pendiente baja); b) horizonte A en bosque de pino (pendiente alta); c) horizonte 2C (pendiente media); d) acercamiento donde se aprecian las hifas y raíces formando cuentas de partículas de pómez.

Figure 3. Radical interaction with aggregates in horizons of different profiles.

a) horizon O in pine forest (low slope); b) horizon A in pine forest (high slope); c) horizon 2C (middle slope); d) approach where the hyphae and roots are appreciated forming beads of pumice particle.

fueron uniendo a las partículas pomáceas (Figura 3).

En el Cuadro 1 y 2 se presentan algunas propiedades químicas y físicas de los suelos estudiados, además de la habilidad radical. En el Sitio 1, donde se cultiva maíz, los contenidos de MO fueron medios (2.5%) para Andosols (Ortiz-Solorio, 2010) y bajos para N_{Tot} ; con un pH que fluctuó de 6.2 en el horizonte superficial a 7.5 en el más profundo. De acuerdo con la clasificación de Young (1976), los suelos estudiados tienen alta fertilidad debido a su alta concentración de cationes intercambiables, principalmente de Ca^+ con un comportamiento regular con la profundidad (de 26 hasta 56 cmol kg^{-1}), y K^+ con valores arriba de 0.4, alta saturación de bases (100%) y un contenido de $P_{soluble}$ de 66 mg kg^{-1} . La alta concentración de nutrientes está relacionada con la aplicación de fertilizantes que los productores agregan anualmente. En los suelos no agrícolas (Sitio 2 y 3), el contenido de MO es bajo en las pendientes medias (2.5%), pero se incrementa hasta 14% (horizonte O) en pendientes bajas; son ligeramente

ácidos, bajo contenido de cationes intercambiables (2.1 cmol kg^{-1} de Ca^{++}), baja saturación de bases (< 50%), y bajo a mediano contenido de K^{++} y N_{Tot} .

La estructura en general fue migajosa en la superficie, con bloques subangulares en los subhorizontes y granular simple en los Lp; sus texturas varían en la superficie de francas en CV y franco arcillo arenoso en los La. Las densidades aparentes oscilan entre 1.1 g cm^{-3} en el suelo y 1.6 g cm^{-3} en el horizonte subsuperficial del suelo agrícola; aunque los valores tienen un comportamiento irregular a lo largo de los perfiles debido a las diferentes discontinuidades litológicas.

Pape y Lager (1995) indicaron que las estructuras pedales (migajosas) generan condiciones para un alto desarrollo radical, no así para las apedales (granulares simples), sobre todo las de textura franco arenosa o más gruesas que ocurren en los suelos. No obstante, en campo se observó la presencia de micelio abundante no sólo en los horizontes superficiales sino también en

Cuadro 1. Propiedades químicas de los suelos estudiados en Calpulalpan, Tlaxcala, México.
Table 1. Chemical properties of the soils studied in Calpulalpan, Tlaxcala, Mexico.

| Horizonte | Profundidad | pH | MO | Cationes intercambiables | | | | CIC | PSB | P | N _{Tot} |
|--|-------------|----------------------|------|--------------------------|------|------|------|------|---------------------|------|------------------|
| | | | | Ca | Mg | Na | K | | | | |
| | cm | 1:1 H ₂ O | % | cmol kg ⁻¹ | | | | % | mg kg ⁻¹ | % | |
| Sitio 1 Pendiente alta (pino y suelo agrícola) | | | | | | | | | | | |
| Ap | 0-12 | 6.2 | 2.57 | 26.2 | 7.8 | 0.65 | 0.64 | 23.5 | 100 | 66.4 | 0.11 |
| Ap ₂ | 12-26 | 7.1 | 2.57 | 33.1 | 11.4 | 0.74 | 0.65 | 12.5 | 100 | 66.4 | 0.11 |
| Bw | 26-45 | 7.4 | - | 38.6 | 0.9 | 0.87 | 0.73 | 22.6 | 100 | - | - |
| 2Bw | 45-62 | 7.3 | - | 46.4 | 1.9 | 0.95 | 1.02 | 27.3 | 100 | - | - |
| 3Bt ₁ | 62-81 | 7.4 | - | 45.1 | 1.9 | 1.06 | 1.34 | 29.2 | 100 | - | - |
| 3B ₂ | 81-89 | 7.5 | - | 46.3 | 1.8 | 1.02 | 1.65 | 27.9 | 100 | - | - |
| 3B ₃ | 89-105 | 7.5 | - | 51.6 | 2.2 | 1.06 | 2.02 | 30.4 | 100 | - | - |
| Sitio 2 Pendiente media (pino y pasto) | | | | | | | | | | | |
| A | 0-20 | 6.1 | 2.5 | 2.1 | 1.1 | 0.9 | 3.4 | 6 | 100 | 6.56 | 0.09 |
| CBw | 20-40 | 6 | 0.5 | 2.1 | 1.1 | 1.1 | 2.6 | 15.5 | 27.9 | 7.59 | 0.03 |
| CB | 40-90 | 6.7 | 0.1 | 2.1 | 1.1 | 0.9 | 1.7 | 12.3 | 47.1 | 7.59 | 0.02 |
| 2C | 90-120 | 6.5 | 0 | 2.1 | 1 | 1.2 | 1.2 | 9.7 | 56.7 | 4.51 | 0.01 |
| 3C | 120-160 | 6.5 | 0 | 2 | 0.9 | 1.4 | 1.8 | 4.6 | 100 | 5.03 | 0.01 |
| Sitio 3 Pendiente baja (pino) | | | | | | | | | | | |
| O | 0-3.0 | 5.5 | 14.3 | 2.16 | 1.04 | 0.61 | 0.93 | 14.3 | 33 | 23.1 | 0.26 |
| A | 3-15 | 6 | 5.45 | 2.08 | 1.05 | 0.63 | 1.12 | 12.9 | 37.7 | 26.7 | 0.14 |
| 2Bw | 15-52 | 6.6 | 1.33 | 2.05 | 1.05 | 0.65 | 2.02 | 12.9 | 44.6 | 9.98 | 0.04 |
| 3C | 52-120 | 7.2 | 0.1 | 1.99 | 0.89 | 0.65 | 1.28 | 6.8 | 70 | 4 | 0 |

MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; PSB = porcentaje de saturación de bases.
 MO = organic matter; CIC = cation exchange capacity; PSB = percentage of base saturation.

los lapillis (Figura 3). De acuerdo con Segura-Castruita *et al.* (2005), los lapillis pomáceos tienen alta capacidad de retención de humedad (hasta 70%) como consecuencia del tamaño de la partícula (2 y 3 mm) y la forma tubular de los poros vesícula. Estos poros al estar interconectados permiten mayor acumulación de humedad y menor pérdida por evaporación y generan una ventaja para los hongos que se relacionaron con estas partículas. Esta característica puede explicar por qué las hifas fueron ensartando a las partículas pomáceas y dando estabilidad de materiales que pueden ser susceptibles a la erosión hídrica.

En el sitio donde se cultiva maíz (Sitio 1), los contenidos de MO son medios (2.5%) para Andosols (Ortiz-Solorio, 2010) y bajos para N_{Tot}; con un pH ligeramente alcalino. De acuerdo con la clasificación de Young (1976) para evaluar la fertilidad, los suelos presentan una alta concentración de cationes intercambiables, principalmente de Ca⁺⁺, con un

comportamiento regular con la profundidad (de 26 cmol kg⁻¹ hasta 56 cmol kg⁻¹), y K⁺ con valores arriba de 0.4 cmol kg⁻¹, alta saturación de bases (100%) y altas concentraciones de fósforo (66 mg kg⁻¹). Esta concentración de nutrientes está relacionada con la aplicación de fertilizantes que los productores agregan anualmente. En los suelos no agrícolas (Sitios 2 y 3), el contenido de MO es bajo en las pendientes medias (2.5%), pero se incrementa (14%), en pendientes bajas donde ocurre incluso un horizonte O; son ligeramente ácidos, con bajo contenido de cationes intercambiables (2.1 cmol kg⁻¹ de Ca⁺⁺) y saturación de bases (menos de 50%), y bajos a medianos en K⁺⁺ y N_{Tot}.

La estructura es en general migajosa en la superficie, bloques subangulares en los subhorizontes y granular simple en los Lp. Las densidades aparentes oscilan entre 1.1 g cm⁻³ y 1.6 g cm⁻³ y con un comportamiento irregular a lo largo de los perfiles. De acuerdo con Pape y Lagger (1995), las estructuras

Cuadro 2. Propiedades físicas de los suelos estudiados de Calpulalpan, Tlaxcala, México.
Table 2. Physical properties of the studied soils of Calpulalpan, Tlaxcala, Mexico.

| Horizonte | Dap | Arenas | Limos | Arcillas | Clase textural | Estructura | Permeabilidad | Habilidad radical | Micelio |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|-------|----------|----------------|------------|---------------|-------------------|---------|
| | g cm ⁻¹ | - - - - - % - - - - - | | | | | | | |
| Sitio 1 Pendiente alta | | | | | | | | | |
| Ap | 1.3 | 44 | 34.5 | 21.5 | Franco | Mi | *** | *** | *** |
| Ap ₂ | 1.3 | 41.2 | 32.7 | 26.1 | Franco | Mi. Bs | *** | *** | *** |
| Bw | 1.6 | 51.5 | 19.8 | 28.6 | FArA | Bs | *** | *** | *** |
| 2Bw | 1.4 | 58.8 | 15.5 | 25.7 | FArA | Bs | *** | *** | ** |
| 3Bt ₁ | 1.4 | 65.3 | 8.2 | 26.5 | FArA | Bs | *** | *** | ** |
| 3B ₂ | 1.3 | 61.1 | 12.1 | 26.7 | FArA | Bs | ** | ** | ** |
| 3B ₃ | 1.4 | 54.9 | 19.2 | 25.8 | FArA | Bs.Gs | ** | ** | ** |
| Sitio 2 Pendiente media | | | | | | | | | |
| A | 1.3 | 25.4 | 37.9 | 36.8 | FAr | Mi | *** | *** | *** |
| CBw | 1.5 | 25.9 | 36.5 | 37.6 | FAr | BS | *** | *** | *** |
| CB | 1.4 | 53.8 | 21.2 | 25 | FAA | Bs | ** | ** | *** |
| 2C | 1.4 | 68.8 | 17.1 | 14 | FA | Bs. Gs | ** | ** | *** |
| 3C | 1.6 | 72.1 | 15.6 | 12.3 | FA | Gs | ** | ** | *** |
| Sitio 3 Pendiente baja | | | | | | | | | |
| O | 1.1 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| A | 1.2 | 49.7 | 36.5 | 13.8 | Franco | Mi | *** | *** | *** |
| 2Bw | 1.5 | 54.5 | 26.9 | 18.6 | FA | Bs | ** | ** | *** |
| 3C | 1.2 | 78.3 | 11.4 | 10.3 | FA | Gs | ** | ** | *** |

pedales (migajosas) generan condiciones para un alto desarrollo radical, no así para las estructurales apedales (granulares simples), sobre todo las de textura franco arenosa o más gruesas que ocurren en los suelos. No obstante, en campo se observó la abundante presencia de micelio no sólo en los horizontes superficiales sino también en los lapillis (Figura 3). De acuerdo con Segura-Castruita *et al.* (2005) los lapillis pomáceos tienen alta capacidad de retención de humedad (hasta 70%) como consecuencia de su tamaño (partículas de 2 y 3 mm) y poros vesícula tubulares interconectados que permiten mayor acumulación de humedad y menor pérdida por evaporación, lo que genera una ventaja para los microorganismos.

Riqueza y Abundancia de Esporas de Hongos Micorrízico Arbusculares

En el horizonte superficial del sitio intermedio (área para cultivo) se encontraron esporas de 10

especies de HMA con una riqueza de especies promedio de 5.8 ± 1.6 D.E. y una dominancia variando de 0.27 a 8.4, que demuestra que existe variación de número de esporas de las especies identificadas. En la Figura 4 se muestra el promedio y error estándar del número de esporas registradas, donde *Funneliformis mosseae* fue el más abundante, seguido de *Acaulospora morrowiae* y *Scutellospora pellucida*.

Análisis Micromorfológico

Los hongos se asociaron con diferentes componentes del suelo de acuerdo con el material parental, tipo de horizonte y minerales amorfos. En el horizonte O (Sitio 3), el micelio fue abundante y se distribuyó por toda la capa de mantillo (Figura 5a). Esta relación cambió en el horizonte A de los tres sitios, donde los hongos y raíces entrelazaron microagregados y formaron macroagregados (Figura 5b); las esporas de diferentes hongos se concentraron predominantemente en

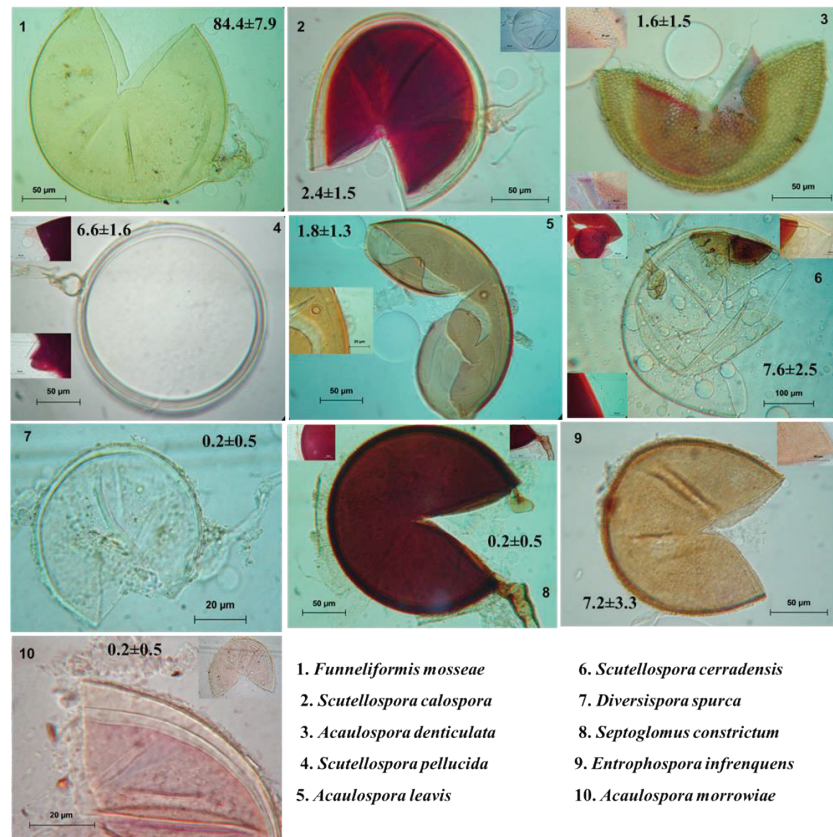


Figura 4. Especies de hongos micorrízico arbusculares del suelo en el horizonte A de un Vitric Andosol en Calpulalpan, Tlaxcala, México.

Figure 4. Species of arbuscular mycorrhizal fungi of the soil in the horizon A of a Vitric Andosol in Calpulalpan, Tlaxcala, Mexico.

el espacio poroso, lo que sugiere que éste es un nicho propicio para su formación. El patrón de crecimiento fúngico y su relación con partículas orgánicas e inorgánicas, se observó por toda la sección delgada correspondiente a cada horizonte.

McDaniel *et al.* (2012) mencionaron que los Andosols pueden degradarse debido a la implementación de cultivos, que desplaza a la cobertura vegetal original y de hecho se consideran suelos frágiles (Krasilnikov *et al.*, 2013). Sin embargo, los autores no consideraron el papel de las comunidades microbianas en los suelos agrícolas en donde los hongos forman parte del fenómeno de resiliencia del sistema. Aunque se identificaron esporas de 10 especies de HMA en el horizonte superficial, fue *F. mosseae* quien dominó, lo cual concuerda con los reportado por otros autores, quienes indican que esta especie contribuye en otros suelos a la formación y estabilidad de agregados de diferentes tamaños en la rizósfera (Wu *et al.*, 2014).

Este resultado sugiere que es probable que la alta actividad fúngica podría permitir, en parte que los Andosols de Calpulalpan, se conserven a pesar de la alta degradación de los suelos generada por las actividades humanas (SEMARNT-CP, 2002¹).

Los lapillis intemperizados (horizontes Bw) presentaron abundante micelio de basidiomicetos (por la presencia de fibulas; Figura 5c), principalmente asociados con macroagregados y minerales amorfos como imogolita y alofano (Figura 5d). Finalmente, las hifas de estos hongos se insertan a las arenas pomáceas a través de las vesículas tubulares y van formando una especie de cadenas en forma de cuentas de partículas (Figura 5d), lo que significa que son más afines a las partículas minerales que a la MO, ya que en el horizonte C prácticamente fue donde se observaron.

La mayoría de los HEcM (Ascomycota y Basidiomycota) tienden a presentarse generalmente en los horizontes superficiales (Jumpponen *et al.*,

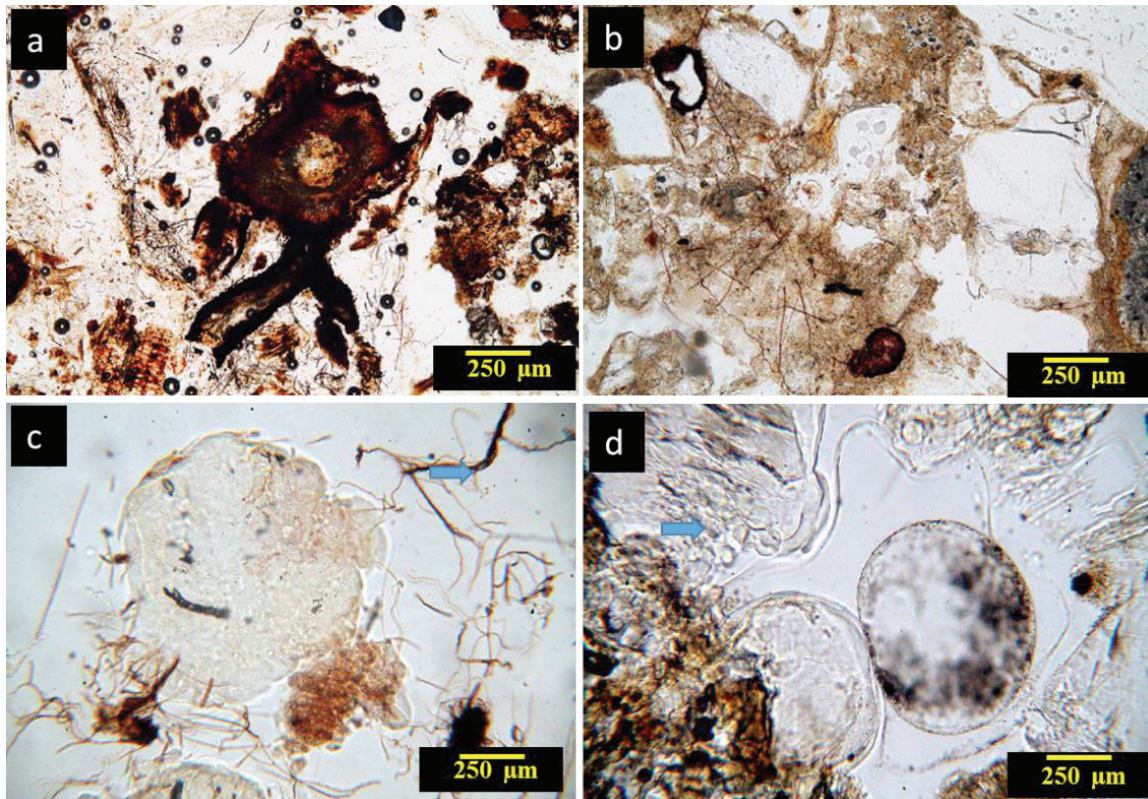


Figura 5. Micelio de hongos micorrízicos arbusculares asociados con diferentes componentes del suelo. a) con residuos orgánicos; b) con macroagregados; c) con imogolita, flecha azul (fibulas); d) con piedra pómez (flecha azul) y espacio poroso. Luz polarizada plana. Andosol de un bosque de Calpulalpan, Tlaxcala, México.

Figure 5. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi associated with different soil components. a) with organic residues; b) with macro-aggregates; c) with imogolite, blue arrow (fibulas); d) with pumice stone (blue arrow) and porous space. Flat polarized light. Andosol from a forest in Calpulalpan, Tlaxcala, Mexico.

2010), donde se concentran los nutrientes del suelo entre ellos el fósforo. Las condiciones edáficas de los suelos estudiados generaron que las raíces hospederas se desarrollaran, sin ninguna restricción, a mayores profundidades a través de todo el perfil junto con los hongos. Este crecimiento atípico del micelio está relacionado con los componentes del suelo con imogolita, partículas primarias (pómez), agregados, y con la MO en proceso de descomposición (Brady y Weil, 1999). Específicamente, con la imogolita, la cual es un mineral amorfo común en Andosols (Jongmans *et al.* 1994), y tiene la capacidad de retener fosfatos y agua (Ma *et al.*, 2012; Guimarães *et al.*, 2013; Yuliani *et al.*, 2017). Además, la imogolita junto con la materia orgánica, contribuye a la construcción de microagregados (Totsche *et al.*, 2017), por lo que los hongos pueden estar asociados con éstas partículas, como una fuente de nutrientes.

En los suelos estudiados, también fue importante la presencia de raíces que formaron macro-poros y se relacionaron con redes miceliales que sujetaron a microagregados, y a su vez formaron macroagregados, lo que incrementó el número de microporos y por lo tanto, el reservorio de humedad y de nutrientes (Sedov *et al.*, 2010). Asimismo, con la liberación de mucílago, se establecen microambientes que los microorganismos colonizan, logrando que el agregado sea más estable (Angers y Caron, 1998).

CONCLUSIONES

- Las propiedades edáficas que permitieron tanto la distribución de raíces como de los hongos a través del perfil, fueron la textura (franca y franco arcillo arenosa) y la estructura (migajosa, granular y granular simple). La estructura compleja conformada por agregados

migajosos (macro y microagregados) y de grano simple (compuesta por lapillis pomáceos), generaron buena aireación, retención de humedad y fertilidad alta en Ca⁺⁺, K⁺⁺ y P, propiciando condiciones para una alta habilidad radical y abundancia de micelio.

- En el Andosols bajo uso agrícola se identificaron esporas de 10 especies de hongos micorrízico arbusculares (HMA) siendo *F. mosseae* la más abundante. El micelio se asoció con diferentes componentes orgánicos e inorgánicos a lo largo de los suelos estudiados. Esto se detectó en la superficie con materia orgánica y con los agregados migajosos y granulares (horizonte O y A), y en los horizontes subsuperficiales (Bw o Bt) con arcillas amorfas (imogolita a alofano) y con granos de arena de pómez.

- Las hifas se distribuyeron entre el espacio poroso de micro o macroagregados, rodeando a la imogolita y el alófono o bien entrelazando las partículas de lapillis como si fueran cuentas.

- La presencia de abundante micelio atrapando a los agregados e inclusive a las partículas de pómez, hasta a más de un metro de profundidad, sugiere que los hongos son un componente biótico que puede contribuir a la estabilidad de los Andosols, y evitar la degradación del bosque de pino y áreas de cultivo en Calpulalpan, Tlaxcala, México.

LITERATURA CITADA

- Angers, D. A. and J. Caron. 1998. Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks. *Biogeochemistry* 42: 55-72. doi: 10.1023/A:1005944025343.
- Bedini, S., E. Pellegrino, L. Avio, S. Pellegrini, P. Bazzoffi, E. Argeese, and M. Giovannetti. 2009. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*. *Soil Biol. Biochem.* 41: 1491-1496.
- Borie, F., R. Rubio, and A. Morales, 2008. Arbuscular mycorrhizal fungi and soil aggregation. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 8: 9-18.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. 1999. *The nature and properties of soil*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Bullock, P., N. Federoff, A. Jongerius, G. Stoops, and T. Tursina. 1985. *Handbook for soil thin section description*. Wayne Research Publ. Wolverhampton, UK. ISBN: 0905184092.
- Cuanalo de la Cerda, H. 1982. *Manual para la descripción de perfiles de suelos en el campo*. Colegio de Postgraduados, Centro de Edafología. Chapingo, México.
- Gerdemann, J. W. and T. H. Nicolson. 1963. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 46: 235-244.
- Guimarães, L., Y. N. Pinto, M. P. Lourenço, and H. A. Duarte. 2013. Imogolite-like nanotubes: Structure, stability, electronic and mechanical properties of the phosphorous and arsenic derivatives. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 15: 4303-4309.
- IBG (The International Bank for the Glomeromycota). 1993. *Glomeromycota PHYLOGENY*. Phylogeny and taxonomy of *Glomeromycota* (arbuscular mycorrhizal [AM] and related fungi). <http://www.amf-phylogeny.com/> (Consulta: abril 2, 2019).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2018. Información por entidad: Tlaxcala (clima). <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tlax/territorio/clima.aspx?tema=me&e=29> (Consulta: abril 2, 2019).
- IUSS Working Group WRB (International Union of Soil Sciences). 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO. Roma.
- Jongmans, T., F. van Oort, P. Burrman, A. M. Jaunet, and J. van Doesburg. 1994. Morphology, chemistry, and mineralogy of isotropic aluminosilicate coatings in a Guadeloupe Andisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 501-507.
- Jumpponen, A, K. L. Jones, and J. Blair. 2010. Vertical distribution of fungal communities in tallgrass prairie soil. *Mycologia* 102: 1027-1041.
- Kasper, M., G. D. Buchan, A. Mentler, and W. E. H. Blum. 2009. Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions. *Soil Tillage Res.* 105: 192-199.
- Krasilnikov, P., M. C. Gutiérrez-Castorena, R. J. Ahrens, C. O. Cruz-Gaistardo, S. Sedov, and E. Solleiro-Rebolledo. 2013. *The soils of Mexico*. Springer. Netherlands.
- Ma, W., W. O. Yah, H. Otsuka, and A. Takahara. 2012. Application of imogolite clay nanotubes in organic-inorganic nanohybrid materials. *J. Mater. Chem.* 22: 11887-11892.
- McDaniel, P. A., D. J. Lowe, O. Arnalds, and C. L. Ping. 2012. Andisols. pp. 33.29-33.48. *In: P. M. Huang, Y. Li, and M. E. Sumner (eds.). Handbook of soil sciences: Resource management and environmental impacts*. CRC Press (Taylor & Francis). Boca Raton, FL, USA.
- Murphy, C. P. 1986. *Thin section preparation of soils and sediments*. AB Academic Publishers, Berkshamsted, England. ISBN: 0907360041.
- Nie, M., E. Pendall, C. Bell, and M. D. Wallenstein. 2014. Soil aggregate size distribution mediates microbial climate change feedbacks. *Soil Biol. Biochem.* 68: 357-365.
- Ortiz-Solorio, C. A. 2010. *Edafología*. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. Chapingo, Edo. de México, México.
- Pape, T. and D. Lager. 1995. *Manual for soil description and classification*. Department of Soil Science and Geology, Wageningen Agricultural University. Wageningen, Netherlands.
- Sedov, S., G. Stoops, and S. Shoba. 2010. Regoliths and soils on volcanic Ash. pp. 275-303. *In: G. Stoops, V. Marcelino, and F. Mees, (eds.). Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Segura-Castruita, M. A., M. C. Gutiérrez-Castorena, C. A. Ortiz-Solorio y P. Sánchez-Guzmán. 2005. Régimen de humedad y clasificación de suelos pomáceos del valle de Puebla-Tlaxcala. *Terra Latinoamericana* 23: 18-20.
- Six, J., H. Bossuyt, S. Degryze, and K. Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79: 7-31.
- Stoops, G. 2003. *Guidelines for the analysis and description of soil and regolith thin sections*. SSSA. Madison, WI, USA.

- Tisdall, J. M and J. M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Eur. J. Soil Sci.* 33: 141-163. doi: 10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x.
- Totsche, K. U, W. Amelung, M. H. Gerzabek, G. Guggenberger, E. Klumpp, C. Knief, E. Lehdorff, R. Mikutta, S. Peth, A. Prechtl, N. Ray, and I. Kögel-Knaber. 2017. Microaggregates in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 181: 104-136. doi: 10.1002/jpln.201600451.
- Van Reeuwijk, L. P. 2002. Procedures for soil analysis. Technical paper 9. International Soil Reference and Information Centre-ISRIC. Wageningen, The Netherlands.
- Wu, Q. S., M.Q. Cao, Y. N. Zou, and X. He. 2014. Direct and indirect effects of glomalin, mycorrhizal hyphae, and roots on aggregate stability in rhizosphere of trifoliolate orange. *Sci. Rep.* 4: 5823. doi: 10.1038/srep05823.
- Young, A. 1976. *Tropical soils and soil survey*. Cambridge University Press. Melbourne, Australia.
- Yuliani, N., E. Hanudin, and B. H. Purwanto. 2017. Chemical characteristics and morphology of amorphous materials derived from different parent materials from Central Java, Indonesia. *Int. J. Soil Sci.* 12: 54-64.