

Caracterización de Necrosoles en el bosque seco tropical en Colombia: un acercamiento desde la geología forense

Santiago Vélez^{1*}, Sergey Sedov², Timisay Monsalve³, Santiago A. Cardona-Gallo¹, Mary L. Quiroz⁴ y Elizabeth Solleiro-Rebolledo²

¹Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Escuela de Geociencias, Núcleo Robledo, Carrera 80 No 65-223, C.P. 050034, Medellín, Departamento de Antioquia, Colombia.

²Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México, México.

³Departamento de Antropología—FCSH, Edificio de Posgrados, Universidad de Antioquia, Calle 10 Sur No. 50e-31, Medellín, C.P. 050023, Departamento de Antioquia, Colombia.

⁴Dirección Ambiental, Social y sostenibilidad Proyecto Ituango, Empresas Públicas de Medellín E.S.P, Edificio EPM - Carrera 58 # 42 - 125, Medellín, C.P. 050015, Departamento de Antioquia, Colombia.

*svelez@unal.edu.co

RESUMEN

Los Necrosoles son suelos relacionados con entierros cuyas propiedades resultan de las condiciones particulares del entorno de la inhumación. Su caracterización por medio de técnicas de geociencia forense, puede aportar herramientas que maximicen la efectividad de la búsqueda de entierros clandestinos, situación relevante en Latinoamérica. El objetivo de este estudio fue identificar rasgos y procesos pedo-antropogénicos que caracterizan a los Necrosoles, específicamente, se identificaron diferencias micromorfológicas y químicas. Se estudiaron tres perfiles de suelo de cementerios rurales en el cañón del río Cauca, en Colombia, y dos perfiles de la misma zona, fuera de la influencia de los cementerios. La comparación de ambos, perfil dentro vs perfil fuera del cementerio, permitió determinar las variaciones en las propiedades producto del impacto de los entierros. Las muestras de los suelos fueron caracterizadas químicamente y mediante métodos micromorfológicos. Los resultados demuestran que las variaciones entre los suelos de cementerios, respecto a sus referentes naturales, son la presencia de microfragmentos de madera de ataúd y de hueso, minerales con orientaciones paralelas, concentración alta de raíces finas al nivel del entierro y mezclas de agregados pedogénicos entre una matriz no pedogénica. Desde el punto de vista químico, las variaciones observadas fueron la mayor concentración de S, Fe móvil, P, además del incremento en la capacidad de intercambio catiónico del suelo. El presente estudio demostró la utilidad de la micromorfología de tres suelos como herramienta en la confirmación de la presencia de Necrosoles a partir de métodos usados en la arqueología y geociencia forense. Se proponen rasgos diagnósticos modelo para la identificación de entierros clandestinos, en particular para zonas que reúnan condiciones de contextos pedológico, geomorfológico y bioclimático similares y que serán útiles en la geociencia forense.

Palabras clave: suelos de cementerio; micromorfología; exhumación; cambio de uso de suelo.

ABSTRACT

Necrosols are soils related to burials, as inhumation conditions produce particular changes in their environment. Consequently, this study using forensic geoscience techniques makes it possible to maximize the effective search for clandestine burials. This constitutes a discipline with few academic initiatives in Latin America. The investigation of our project arose from exhumations of three rural cemeteries that took place when changes in land use of the Ituango hydroelectric project in the Cauca river canyon in Colombia, flooded the communities. During the exhumation process, the description and sampling of the profiles within the 3 cemeteries was carried out. Likewise, natural profiles were described and sampled in the surroundings of 2 out of 3 cemeteries, to determine the variations of the micromorphological and chemical properties resulting from the effect of the burials. The soil samples were analyzed with chemical and micromorphological methods. The study objective was the identification of differences between the natural and intervened soils, in order to propose features and pedo-anthropogenic processes that characterize the studied Necrosols. The results show clear differences between the cemetery soils, with respect to their natural counterparts. In consequence we found coffin wood and bone microfragments, minerals with parallel orientations, and high concentration of roots at the burial level and pedogenic aggregates mixtures incorporated into non-pedogenic matrix. From the chemical point of view, the Necrosols compared to natural soils, show highest concentration of S, mobile Fe, P, in addition to the increase of the soil cation exchange capacity. The present study demonstrated the usefulness of micromorphology as a powerful tool in confirming the presence of Necrosols with methods used in forensic archeology and geoscience. In accordance with the objective set out in this work, it was possible to characterize particular micromorphological and chemical properties in Necrosols to determine pedo-anthropogenic features and processes. The observed results in the Necrosols of three cemeteries in the tropical dry forest in Colombia could be proposed as model diagnostic features for the identification of clandestine burials;

particularly for areas that meet similar pedological, geomorphological, and bioclimatic contexts. This could be useful in forensic geoscience.

Key words: micromorphology; exhumation; land use change; cemetery soils.

INTRODUCCIÓN

La llamada geología forense integra ciencias como la geología, geofísica y pedología con el objetivo de apoyar las investigaciones criminales, ambientales y humanitarias. Pye y Croft (2004), definen esta integración como la aplicación de la geociencia y técnicas más amplias de la ciencia ambiental en las investigaciones judiciales. Las investigaciones geoforenses van desde el estudio directo de materiales naturales, tales como suelos, sedimentos, aire y agua, a materiales de origen antropogénico, como ladrillos, concreto, cerámica y vidrio. Sumado a esto Ruffell (2010) considera que el uso de técnicas indirectas como percepción remota e implementación de sistemas de información geográfica puede apoyar dichas investigaciones. No obstante, desde la perspectiva de Ruffell (2013), aunque la geología forense es vista como un instrumento para determinar si las personas (víctimas o criminales) han estado en una escena del crimen, en la actualidad, su enfoque es más extenso incrementándose el grado de aplicación de las ciencias de la Tierra. Aunque el uso de la geología forense apoya el esclarecimiento de las investigaciones judiciales desde hace más de un siglo, no es hasta la década de los setentas del siglo XX que se su estudio se sistematiza (Murray, 2004). En años recientes, en algunos países como el Reino Unido, el uso de herramientas pedológicas y geológicas en investigaciones penales y civiles se ha incrementado, sin embargo, en otros países su aplicación es más limitada debido a que el grado de aceptación de estas herramientas varía en los diferentes tribunales (Pye y Croft, 2004).

En Latinoamérica, particularmente en Argentina y Colombia, se cuenta con iniciativas académicas recientes que comienzan a apoyar la elucidación de las tendencias y patrones de las inhumaciones furtivas, en el contexto de los conflictos armados (Molina *et al.*, 2015; Sagripanti *et al.*, 2017). En México, no hay investigaciones básicas ni aplicadas, lo que muestra la necesidad del avance científico en este campo, para la búsqueda efectiva de entierros clandestinos y fosas comunes en el territorio mexicano.

La búsqueda y localización de entierros clandestinos, se considera un campo de investigación en expansión que requiere un conjunto de métodos y protocolos estandarizados, para maximizar su efectividad (Pringle *et al.*, 2012; Di Maggio, 2017). Por otra parte, la geociencia forense también se sitúa al servicio de los proyectos de búsqueda y recuperación de restos humanos en el marco ambiental y social, sin implicaciones judiciales. Ejemplo de ello es la exhumación y traslado de cementerios realizadas en la reubicación de comunidades por cambios regionales de uso de suelo, otro ejemplo son los estudios de servicios ecológicos que apoyan la planificación y construcción de necrópolis cerca de centros urbanos y fuentes de agua (Massas *et al.*, 2018; Nero y Anning, 2018; Ghosh *et al.*, 2019).

Los suelos afectados por entierros de cuerpos humanos conforman los denominados Necrosoles. Según las tipologías de los suelos urbanos, estudiadas y propuestas en los trabajos de Stroganova *et al.* (1998), Gerasimova *et al.* (2003), Sobocká (2004), Prokof'eva *et al.* (2010) y Charzyński *et al.* (2013), los Necrosoles presentan alteraciones morfológicas por ausencia de horizontes naturales, mezcla y adición de horizontes. Además, hay presencia de materiales exógenos que rellenan la tumba, abundancia de artefactos fúnebres y restos humanos. Respecto a alteraciones químicas, estos suelos están artificialmente

enriquecidos con materia orgánica y concentraciones elevadas de fósforo debido a la descomposición de los restos.

En el Departamento de Antioquia, Colombia, se llevó a cabo el proyecto de exhumación y traslado administrativo de los cementerios comunitarios de las localidades de Orobajo, Barbacoas y La Fortuna debido a la construcción de la Hidroeléctrica Ituango, de Empresas Públicas de Medellín (EPM), en el cañón del río Cauca (Figura 1). La finalidad del traslado de dichos cementerios consistió en la restitución integral y con un sentido social de la herencia fúnebre perteneciente a las comunidades reubicadas. Estos cementerios rurales, no tenían formalidad administrativa y carecían de actas de inhumación-exhumación. Al momento de la prospección y excavación, tampoco poseían estructuras diferenciadoras en el terreno como monumentos ni lápidas, lo que precisó de la integración de técnicas antropológicas y pedológicas en la búsqueda de los restos para su recuperación.

A los métodos pedológicos que se prestó mayor importancia fueron los estudios micromorfológicos y la determinación de propiedades químicas, para documentar las mínimas pedoturbaciones, derivadas de los entierros. Este tipo de trabajo ha probado ser exitoso, ya que muestra una relación directa con alteraciones químicas del suelo, derivadas de la descomposición de los cadáveres (Usai *et al.*, 2014; Burns *et al.*, 2017). Es así que se planteó como objetivo de este trabajo caracterizar las propiedades micromorfológicas y químicas para definir rasgos y procesos pedo-antropogénicos en los Necrosoles de tres cementerios en el bosque seco tropical de Colombia. Derivado de esta caracterización, se contó con un conjunto de rasgos que permitió la identificación de los suelos afectados por las actividades funerarias, en particular para los casos en donde no se cuenta con claridad en cuanto a la distribución de las tumbas. Con esta información obtenida a partir del estudio de suelos en cementerios sin contexto forense, se proponen rasgos diagnósticos para la identificación de entierros que pueden apoyar investigaciones de geología forense.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características geológicas y ambientales de los cementerios

El área de estudio comprendió tres cementerios rurales, ubicados sobre terrazas aluviales con influencia coluvial, en el cañón del río Cauca, Departamento de Antioquia, Colombia (Figura 1). El cementerio de Orobajo, con un área de 1316 m² (7°01.671'N y 75°47.536'W), estaba en la margen derecha del río Cauca, Municipio de Sabanalarga a 331 m sobre el nivel del mar (m s.n.m.). El cementerio de Barbacoas, con un área de 642 m², se encontraba en la margen izquierda del río Cauca, Municipio de Peque (6°55.700'N y 75°49.757'W) a 382 m s.n.m. El cementerio de Fortuna, con un área de 330 m², localizado en la margen izquierda del río Cauca, Municipio de Buritica (6°46.012'N y 75°51.663'W) a 371 m s.n.m. Los restos humanos de estos cementerios comunitarios fueron exhumados para su traslado administrativo, ya que la región fue inundada por las aguas del Proyecto Hidroeléctrico Ituango. Según Caballero *et al.* (2016) el cañón del río Cauca es una depresión formada por un cañón de 2000 m de profundidad, con incisión de superficies de erosión bien conservadas de la Cordillera Central de los Andes Colombianos, en un relieve modelado por la neotectónica y las variaciones climáticas durante el Cuaternario (Suter *et al.*, 2011).

El contexto bioclimático corresponde al bioma bosque seco tropical, que presenta precipitaciones anuales que fluctúan entre 250 a 2000 mm, con tres o más meses de sequía (<100 mm) al año y evapotranspiración potencial que supera a la precipitación. La temperatura anual promedio es igual o mayor a 17 °C, con dos periodos de sequía de diciembre a marzo, y entre julio y agosto, y mayor precipitación entre mayo y octubre (Espinal, 1985; Pizano *et al.*, 2014).

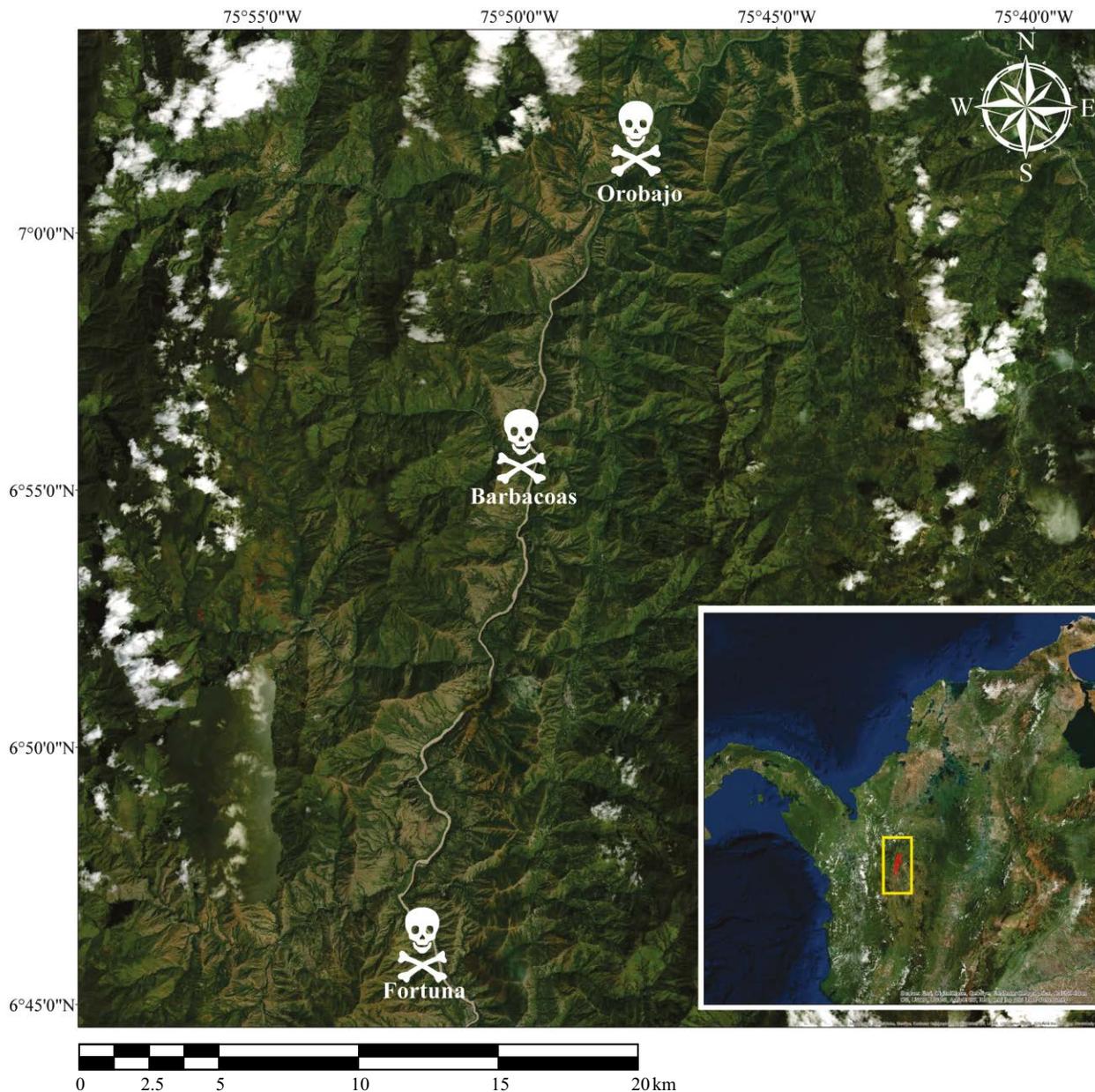


Figura 1. Localización del área de estudio: cañón del río Cauca y cementerios de Orobajo, Barbacoas y Fortuna.

Trabajo de campo

El trabajo de campo se realizó durante los meses de noviembre del 2017 a febrero del 2018, en el contexto de la exhumación y traslado de los cuerpos sepultados en los tres cementerios de las comunidades que fueron reubicadas. Sus habitantes desempeñaban labores de minería aurífera aluvial- artesanal, pesca y ganadería marginal. El asentamiento de las comunidades, así como los cementerios, estaban dentro de la cota de inundación de la Hidroeléctrica Ituango. Estos cementerios eran administrados deficientemente y no contaban con actas de inhumación ni de exhumación de los cuerpos y tampoco tenían referenciación espacial de las tumbas, ni lápidas o monumentos. La fecha de constitución de los tres cementerios no era conocida por sus habitantes con exactitud, aunque en Barbacoas las personas adultas mayores de la localidad reportaron que podía ser un sitio de ocupación para enterramientos humanos de más de ochenta años de antigüedad

y los de Orobajo señalaron 40 años de ocupación del cementerio para estos fines, mientras que el cementerio Fortuna estaba en desuso desde la década de 1950. Para la localización de las tumbas, se realizaron perforaciones con barreno manual, relacionadas con la presencia de depresiones sobre el terreno. Estas perforaciones permitieron la confirmación estratigráfica y extracción de muestras de fragmentos óseos u otros objetos relacionados con los entierros como trozos textiles y de madera o clavos de ataúd.

En las áreas naturales adyacentes a los cementerios se realizaron perfiles pedológicos. Del mismo modo, se hicieron perfiles para la descripción del suelo dentro del área de las tumbas. La descripción de las características morfológicas de ambos tipos de perfiles se hizo de acuerdo con los parámetros de la “Guía para la descripción de suelos” (FAO, 2009). Sin embargo, el suelo natural de Fortuna no se describió, dado que todo el terreno adyacente al cementerio estaba alterado por



Figura 2. Evidencia macromorfológica en los perfiles pedológicos naturales. a) Una vista panorámica del relieve asociado a los suelos naturales. b) Perfil de suelo natural.

trabajos de minería y el único lugar no perturbado por minería fue el cementerio. De cada perfil dentro de los cementerios así como de los suelos naturales fueron tomadas muestras para análisis químicos y muestras inalteradas y orientadas para la preparación de secciones delgadas. Los muestreos fueron realizados por cada horizonte pedológico identificado en los suelos naturales así como en las tumbas seleccionadas.

Análisis micromorfológico

Para el análisis micromorfológico, se prepararon secciones delgadas a partir de muestras de suelo sin disturbar, impregnadas con resina poliéster a temperatura ambiente. Una vez endurecidas, fueron cortadas en láminas delgadas y pulidas a 30 μm , de acuerdo con Fitzpatrick (1984). Las láminas se observaron bajo un microscopio petrográfico Olympus BX51 y se describieron de acuerdo con Bullock *et al.* (1985). Esta descripción se basó en la identificación del grado de reorganización de los materiales alterados, inclusive a nivel de micropartículas, debido a la pedoturbación, haciendo una comparación con los perfiles naturales a escala microscópica (Courty *et al.*, 1989).

Análisis químicos

En laboratorio se determinaron, de acuerdo con el manual de métodos analíticos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2006), la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) por medio de suma de cationes de cambio; el contenido de azufre (S) por fosfato Olsen -EDTA; y el contenido de fósforo (P) por el método Bray II.

Con la información generada, se realizó un análisis estadístico de varianza ANOVA con 95 % de confianza de las propiedades químicas evaluadas en los tipos de suelo. Para este análisis se utilizó el programa estadístico libre R versión 3.4.3. Se relacionaron las propiedades químicas con los tipos de suelo y con la profundidad relativa.

RESULTADOS

Morfología de los objetos de estudio

Los suelos naturales en los cementerios de Barbacoas y Orobajo tienen características morfológicas similares, identificándose los siguientes horizontes: Ap, A, Bc, C1, C2, C3 (Figura 2). El horizonte Ap muestra un color pardo grisáceo muy oscuro que contrasta con el horizonte A, subyacente, de color pardo muy oscuro. Ambos horizontes tienen una estructura granular, con abundantes poros biogénicos;

son arenosos y presentan gravas. El horizonte BC muestra colores más amarillentos, con abundantes fragmentos de roca. Los horizontes C son más arenosos, con menor proporción de gravas; las arenas están bien seleccionadas (Figura 2). El perfil natural tiene un origen coluvio-aluvial. Los materiales coluviales dominan en la parte superior del perfil, producto del aporte de materiales de las laderas adyacentes, en tanto que los materiales aluviales se encuentran en la parte baja. Los suelos naturales fueron clasificados como *Colluvic Regosols* (IUSS Working Group WRB, 2015), poco evolucionados y sin un horizonte diagnóstico definido.

Los suelos de tumbas, dentro de los cementerios, presentan horizontes con discontinuidades y mezcla de materiales por acción antropogénica. El perfil característico denota la presencia de un horizonte Ap incipiente de color pardo amarillento claro y mezcla de materiales arenosos y gravas redondeadas de origen aluvial, con fragmentos de roca angulosos de origen coluvial. Los horizontes inferiores (LF) están constituidos por material de relleno de las tumbas (Figura 3) con una mezcla de agregados provenientes del horizonte A y presencia de materiales asociados a los entierros, como fragmentos de madera y clavos de ataúd, trozos textiles y fragmentos de huesos humanos.

A nivel micromorfológico la configuración del suelo natural presenta un horizonte Ap con microestructura de bloques angulares a subangulares, finos a medios. Los componentes gruesos estaban dominados por granos minerales angulosos, frecuentes fragmentos de biotita en diferentes estados de intemperización y fragmentos de roca subangulosos de origen coluvial con bajo grado de intemperismo. Se observa presencia de materia orgánica humificada en forma del pigmento oscuro en el material fino (Figuras 4a y 4b), y estructuras biogénicas que corresponden coprolitos y microagregados granulares que forman microáreas esponjosas entre los bloques (Figura 4c) o que se encuentran en forma de rellenos en algunos poros grandes (Figura 4d). Solo en el horizonte Ap se observaron algunas raíces finas frescas. El horizonte BC presentó microestructura granular simple, suelta y porosa. Hubo presencia de algunos bloques subangulares, abundantes granos minerales gruesos de tamaños heterogéneos entre ellos los más gruesos son fragmentos de roca (Figura 4e), mientras que entre más finos hay abundantes micas. Los coprolitos son muy escasos. Los horizontes inferiores C2 y C3 se presentaron compactos. Su composición estaba dominada por granos minerales redondeados de tamaño arena fina y bien clasificados de origen aluvial (Figura 4f).

La micromorfología de los suelos de las tumbas dentro de los cementerios presentaba horizontes Ap con composición heterogénea: ma-

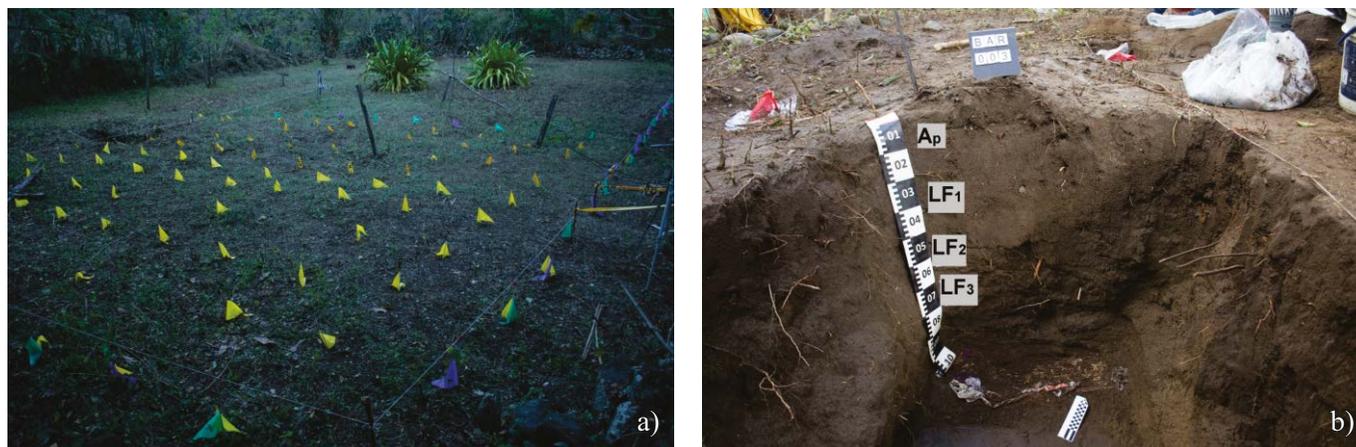


Figura 3. Evidencia macromorfológica de perfiles pedológicos intervenidos. a) Vista panorámica del cementerio Barbacoas. b) Perfil: cementerio Barbacoas.

teriales más finos y clasificados provenientes de los depósitos aluviales inferiores mezclados con fragmentos gruesos típicos para los estratos coluviales superiores (Figura 5a). En estos horizontes y en los rellenos subyacentes hubo varias microáreas con orientación de minerales micáceos de la fracción gruesa, con tendencias paralelas entre granos alargados. Estas microáreas presentaron agrupaciones con diferentes grados de paralelismo respecto a la línea de los horizontes (Figura 5b). En complemento, el material de relleno las de tumbas LF contenía agregados pedogenéticos enriquecidos en materia orgánica coloidal que estaban incorporados en la matriz dominada por material mineral arenoso de origen aluvial (Figura 5c). Los horizontes más profundos, (entre 58–182 cm) mostraron frecuentes raíces finas frescas (Figuras 5d y 5e) y coprolitos asociados con la actividad biogénica (Figura 5f).

La distribución de las inclusiones de los materiales antropogénicos era muy heterogénea en los suelos asociados con las tumbas: en algunas láminas esas inclusiones abundaban mientras en otras ausentaban. En particular, se observaron grandes fragmentos de madera con el grado de descomposición baja a mediana. Asociada a esos fragmentos estaba calcita microcristalina (micrita) que formó clústeres en los poros del tejido de madera (Figuras 6a, 6b y 6c). Otro componente antrópico son pocos fragmentos de hueso, relativamente grandes y con su estructura porosa típica (Figura 6d). En la Tabla 1 se ilustra la abundancia relativa de estas características entre los suelos de cementerio y los perfiles naturales.

Propiedades químicas de los objetos estudiados

Los suelos de los cementerios respecto a los naturales presentan características químicas diferentes, aunque estas diferencias no tienen significancia estadística y su variabilidad es alta (Figuras 7 y 8). Los valores de Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE), S, Fe móvil y P son más elevados en los suelos provenientes de los cementerios, aunque las diferencias en CICE son muy pequeñas (Figura 8). Con respecto a la profundidad, los contenidos de S, Fe móvil y P muestran valores más altos en los horizontes más profundos de los suelos de los cementerios; la CICE tiene un valor mayor en la muestra superficial.

DISCUSIÓN

Tanto a nivel macro como micromorfológico, los suelos intervenidos dentro de los cementerios tuvieron diferencias marcadas con los suelos naturales. En condiciones naturales, la organización de los

horizontes y la pedogénesis estaban bien definidas, acorde con el origen de los materiales parentales. Los suelos naturales mostraron un claro aporte aluvial, sobre todo en la base de los perfiles en donde abundaron las fracciones arenosas bien seleccionadas; pero también se detectó una mezcla de aportes gravitacionales, manifestándose en la presencia de gravas angulares, de diversos tamaños en los horizontes superficiales (Figura 4). Por lo tanto, el origen de los suelos es coluvio-aluvial. La pedogénesis que presentaron es de carácter incipiente, dado la escasa horizontalización que se observó (Figura 2). Los perfiles fueron clasificados como *Colluvic Regosols* ((IUSS Working Group WRB, 2015). En comparación, los suelos dentro de los cementerios presentaron una mezcla de diversos materiales (Figura 5a). Esta mezcla estaba dominada por materiales de relleno de las tumbas con presencia de restos de ataúd y fragmentos de hueso (Figura 6) así como fragmentos de agregados de suelo dentro de una matriz no pedogénica (Figura 5c). En los perfiles descritos los materiales de relleno fueron indicados por los prefijos LF (FAO, 2009). Esta alteración fue producto de la excavación y el relleno de las tumbas. Debido a esto, las propiedades originales de la composición original del suelo fueron alteradas. Este tipo de pedoturbación originada por los entierros humanos, permitió clasificarlos como Necrosoles (Sobocká, 2004; Charzyński et al., 2010; Charzyński et al., 2011).

Los Necrosoles mostraron enriquecimiento de fragmentos óseos que fueron observados a nivel macromorfológico y en algunas observaciones micromorfológicas. Esto repercutió en elevados valores de P, sobre todo en los estratos profundos (Figuras 7 y 8), coincidiendo también con una mayor concentración de Fe y S, que pueden relacionarse a la presencia de los restos de clavos y a la descomposición de los cadáveres, respectivamente. Tanto los valores de P como de Fe y S fueron menores en los suelos naturales (Figura 8). Por esta razón, se les asignó un origen antropogénico (Majgier y Rahmonov, 2012; Charzyński et al., 2015).

Otra alteración detectada a nivel micro-estructural fue la mezcla de agregados pedogénicos provenientes de los horizontes superficiales entre la matriz no pedogénica proveniente de los depósitos aluviales subyacentes. Así como la mezcla de fragmentos líticos de origen coluvial mezclados con la matriz de origen aluvial. Esto evidenció las movilizaciones, transporte y nueva deposición de materiales del suelo y sedimentos (Figuras 5a, 5b y 5c), lo cual está acorde con patrones espaciales de distribución preferencial de materiales relacionados con los enterramientos y las actividades de corte y relleno de tumbas (Usai et al., 2014; Burns et al., 2017).

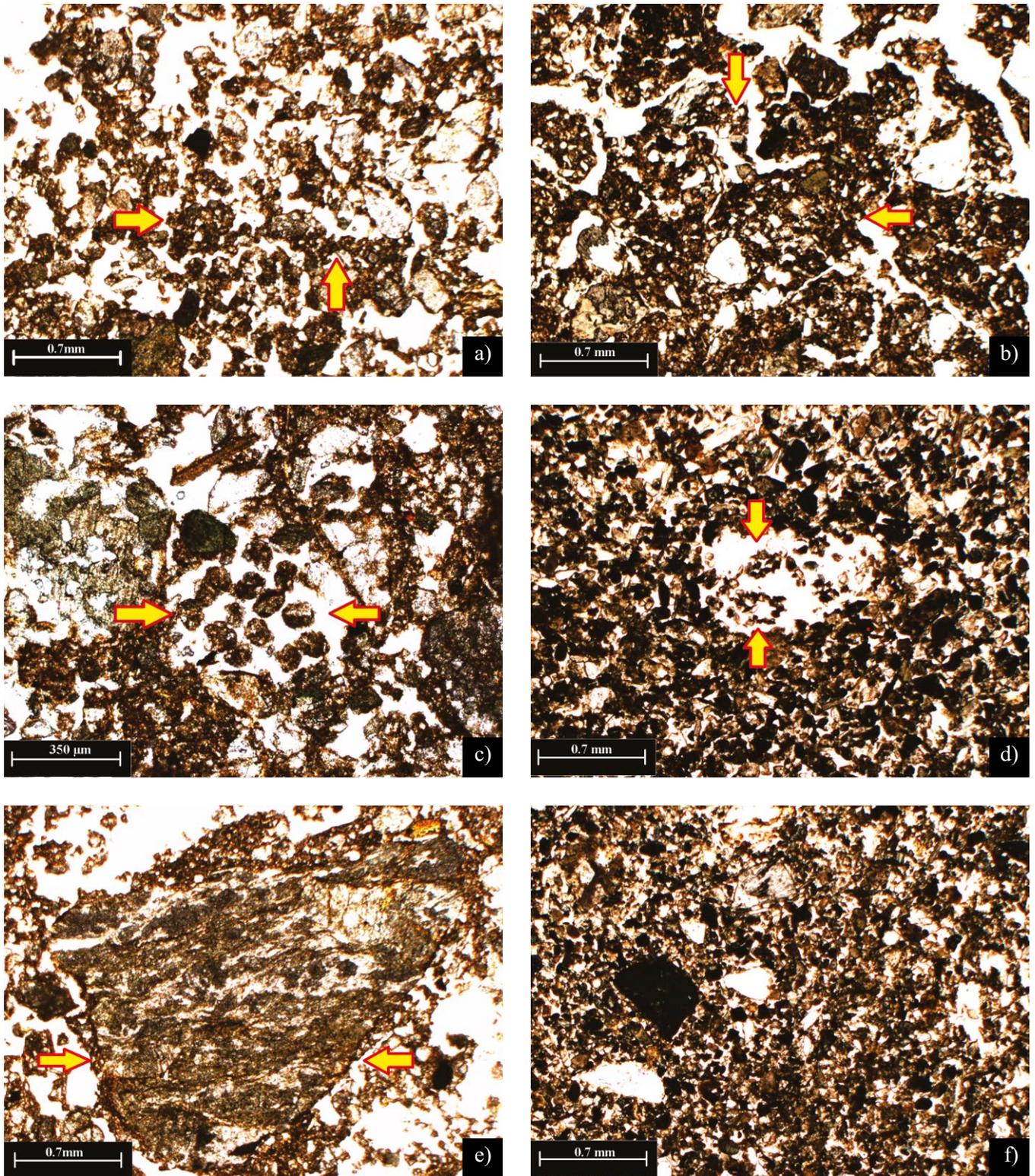


Figura 4. Micromorfología de los suelos naturales: a) Microestructura de bloques angulares a subangulares, finos a medios y composición granulométrica de origen coluvial del horizonte Ap (15–28 cm) Orobajo. b) Materia orgánica humificada en forma del pigmento oscuro en el material fino horizonte Ap (0–22 cm) Barbacoas. c) Estructuras biogénicas–microagregados granulares correspondientes a coprolitos y microáreas esponjosas entre los bloques en horizonte Ap (15–28 cm) Orobajo. d) Coprolitos como rellenos en algunos poros grandes en horizonte BC (55–68 cm) Barbacoas. e) Fragmento de roca poco intemperizado en horizonte BC (33–50 cm) Orobajo. f) Composición de horizontes C2 y C3 (53–66 cm) Orobajo.

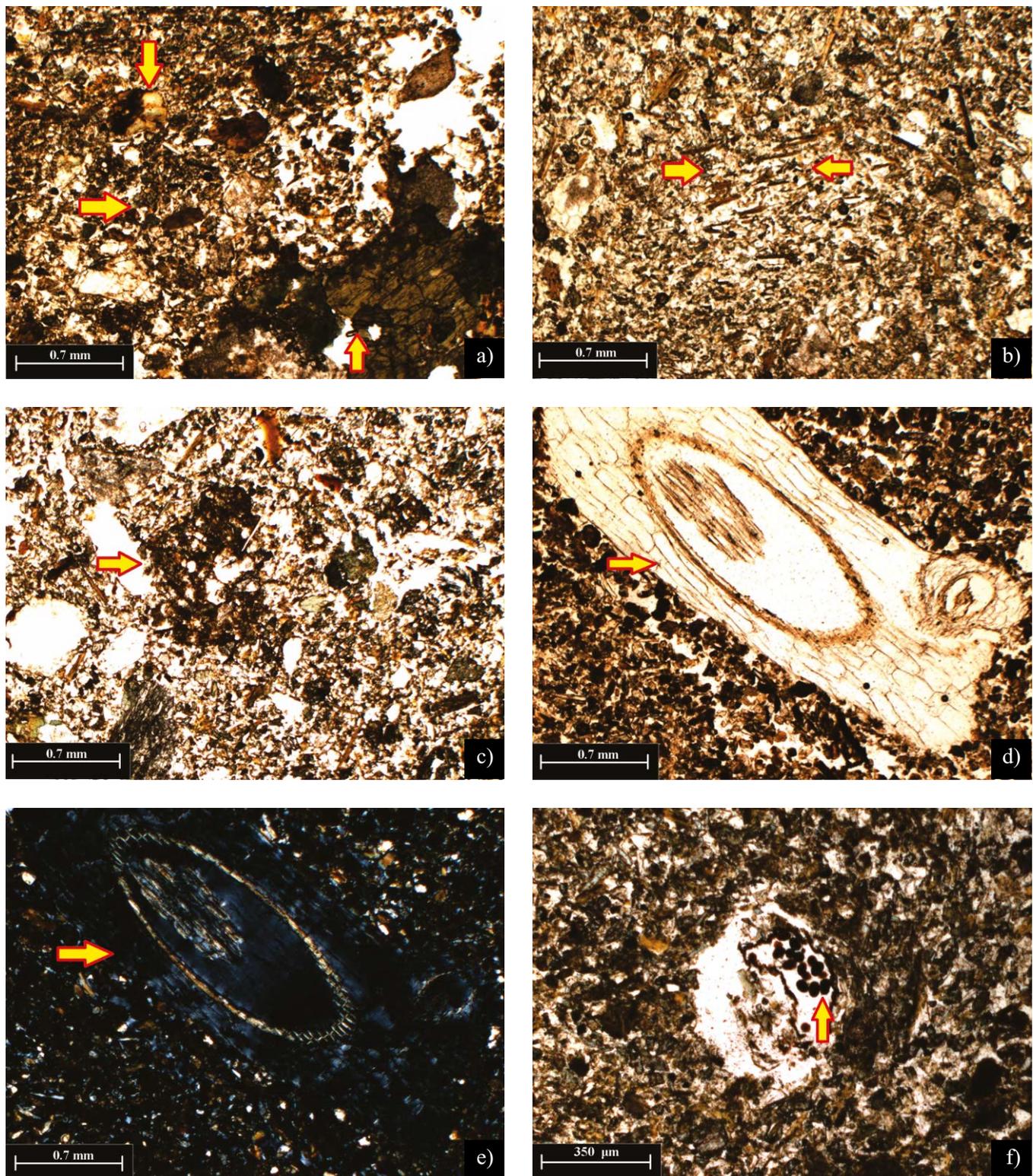


Figura 5. Micromorfología de suelos de cementerio: Composición y estructura microscópica de los suelos de las tumbas. a) Composición heterogénea del horizonte Ap (0–8 cm) perfil típico de tumba Orobajo. b) Microáreas con orientación de minerales micáceos de la fracción gruesa en material de relleno LF (75 cm) Orobajo. c) Mezcla de agregados pedogenéticos entre matriz fingranular en material de relleno de tumbas LF (25–37 cm) Orobajo. d) Raíces frescas finas en perfil de tumba réplica de Orobajo a 182 cm de profundidad vista sin Nicóles Cruzados. e) Raíces frescas finas en perfil de tumba réplica de Orobajo a 182 cm de profundidad vista con Nicóles Cruzados. Se ven colores de interferencia de los tejidos radicales. f) Conjunto de coprolitos de mesofauna asociados con actividad biogénica en material de relleno de tumbas LF (52–100 cm) Barbacoas.

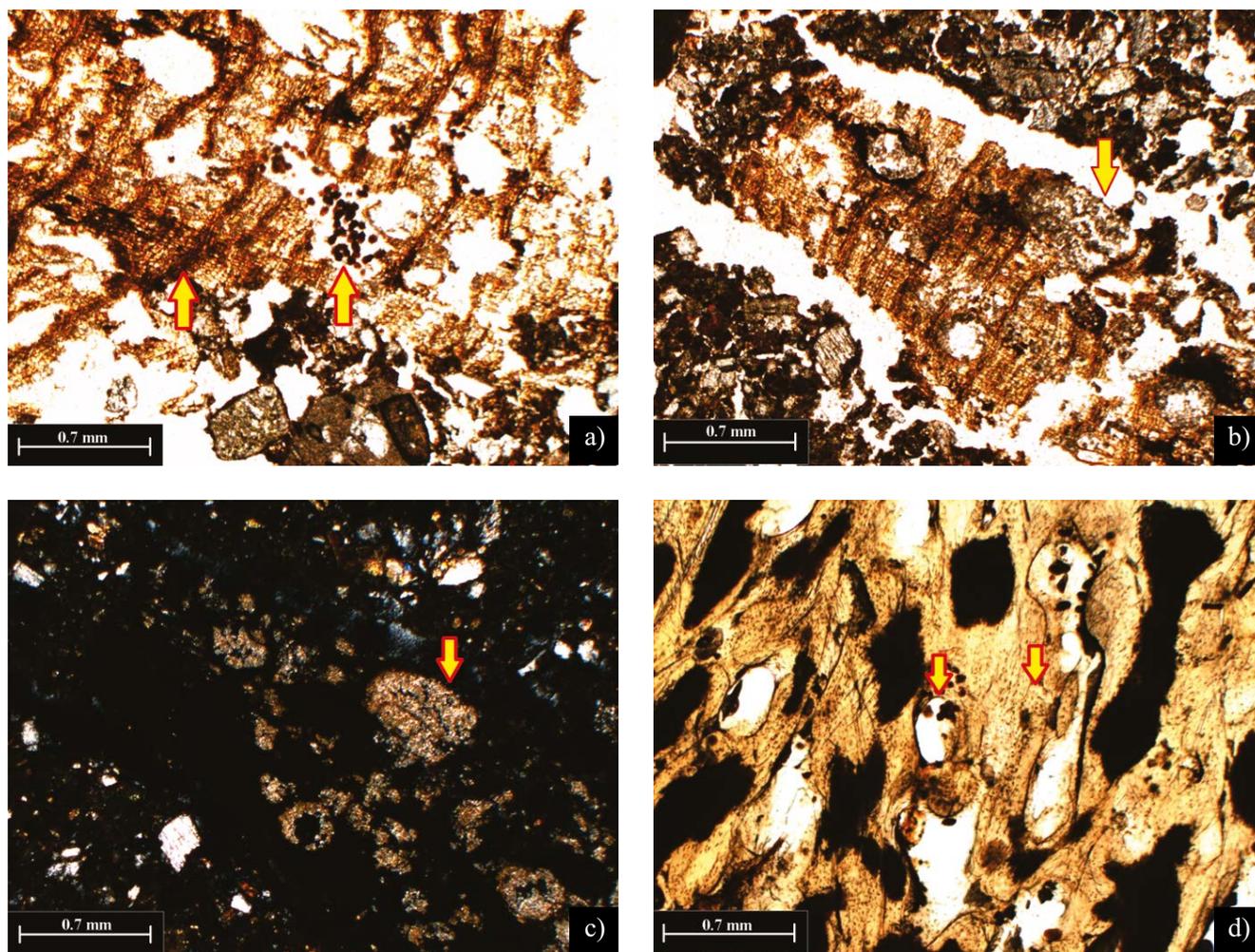


Figura 6. Micromorfología Componentes antrópicos en los suelos de las tumbas: a) Fragmento de madera en estado medio de descomposición con coprolitos en relleno LF de tumba (94–106 cm) Barbacoas. b) Fragmento de madera con micrita vista sin Nicoles cruzados (94–106 cm) tumba en Barbacoas. c) Fragmento de madera con micrita vista con Nicoles cruzados. Se ven colores de interferencia de la micrita (94–106 cm) tumba Barbacoas. d) Fragmento de hueso esponjoso con coprolitos a 100 cm de profundidad en tumba de Barbacoas.

La presencia de coprolitos en cámaras biogénicas fue común en ambos tipos de suelo, lo que sugirió que la actividad de invertebrados en el suelo no los diferencia. Sin embargo, la colonización de raíces finas frescas (Figuras 5d y 5e) al nivel donde se depositaron los cuerpos (Sagara *et al.*, 2008) mostró un carácter diferenciador de los suelos intervenidos con entierros de restos humanos respecto a los naturales. Además, los suelos sin restos enterrados no presentaron concentraciones específicas de este tipo de raíces. Por el contrario, las raíces finas se concentraron únicamente en el horizonte superficial. Esta colonización prominente de raíces al nivel de los restos humanos depositados se debe al estímulo que recibe el sistema radical de las plantas por los nutrientes heredados de la descomposición de los tejidos (Sagara *et al.*, 2008).

Otro rasgo interesante detectado en los suelos de entierros fue que algunos fragmentos de madera de ataúd tenían acumulaciones de calcita microcristalina. Dado que en ningún otro horizonte natural se detectó calcita, ni de carácter litogénico ni pedogénico, se sugiere que un origen antrópico por adiciones de cal en las tumbas (Zimmermann *et al.*, 2016; Mordhorst *et al.*, 2017). Sin embargo, esta interpretación contrasta con la información clarificada por la personas de la comunidad. Ellas replantearon la no adición de cal en

las tumbas pero si la reutilización de piezas de madera provenientes de las casas locales que podían estar pintadas con cal, para la construcción de los ataúdes. Las condiciones económicas en estos lugares estaban determinadas por precariedad económica y acceso escaso a recursos como la madera aserrada para la elaboración de cajones fúnebres.

A pesar de todas las evidencias mostradas se destaca que tanto los cambios estructurales y de organización a nivel microscópico en los suelos del cementerio, se presentaron de forma escasa y localizada. La escasa dispersión de fragmentos de esqueleto y objetos del enterramiento se debió posiblemente, a que durante el proceso de exhumación, estos fueron extraídos cuidadosamente. En este sentido los Necrosoles se diferencian de otros suelos antropogénicos como los Technosols, Urbanozems y de los suelos arqueológicos, donde los microartefactos son abundantes (Prokof'eva *et al.*, 2010; Sedov *et al.*, 2017; Triana-Vega *et al.*, 2018).

Contrario a las inclusiones de los materiales antrópicos en suelos arqueológicos, Technosols y Urbanozems, los rasgos más comunes en los Necrosoles fueron las modificaciones de orientación de minerales laminares y alargados, en primer lugar, las micas (Figura 5b). Su orientación paralela por grupos se observó en casi todos los horizontes

superficiales y material LF de los suelos de entierros. Esta observación presentó una diferencia contrastante con los horizontes superiores en los suelos naturales, en donde la orientación de los minerales fue aleatoria, típica para los materiales coluviales, que además fueron afectados por bioturbación. Es posible que esta orientación paralela se debió al efecto de las compactaciones hechas en los entierros, por el golpeteo de las palas y el pisoteo de las tumbas en superficie, que hacen los enterradores. Es decir que, de acuerdo con la fuerza aplicada durante el pisoteo, las partículas se pudieron orientar en diversas posiciones, con diferente grado de paralelismo, respecto al horizonte. Se supone que serían más horizontales en donde hubo mayor golpeteo o apisonamientos de carácter antrópico, dando rasgos similares a las marcas de pala que caracterizan los epipedones plaggen (SSS, 2014). Sin embargo, en el caso de los entierros, el apisonado ha formado agrupaciones, tanto a nivel superficial como en la profundidad de los materiales de relleno LF.

Gracias a las observaciones micromorfológicas, fue posible identificar en los Necrosoles rasgos que evidenciaron los procesos pedo-anthropogénicos y que los diferenciaron de otros suelos de origen antrópico o natural. Tal es el caso de la translocación y mezcla de agregados pedogenéticos, entre matrices no pedogenéticas, la ocurrencia de orientaciones paralelas de origen antrópico de minerales alargados y la presencia localizada y escasa de artefactos provenientes de los entierros (Tabla 1).

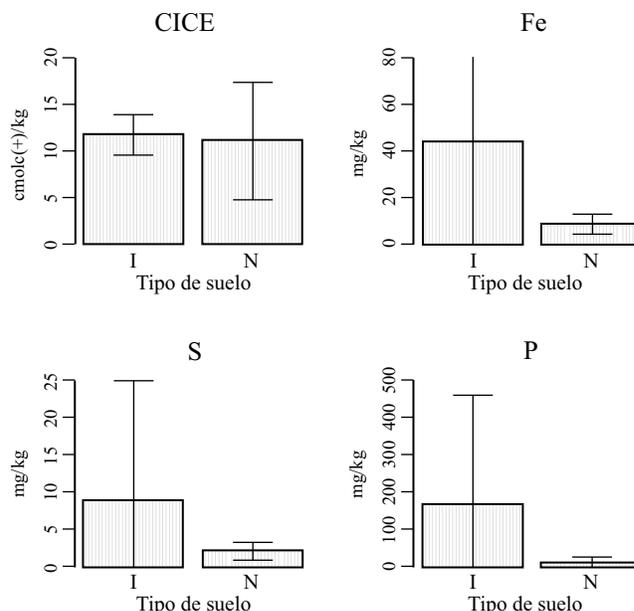


Figura 7. Diagrama de barras de propiedades químicas entre suelos naturales (N) y de cementerio (I).

Tabla 1. Abundancias relativas de rasgos micromorfológicos en suelos naturales y perfiles de cementerio.

Perfil Pedológico	Horizonte ^a (profundidad)	OPM	MH	RF	H	M	C
Natural.	Ap-BC (15-28cm)	□	□	□	□	□	++
Orobajo	BC-C1 (33-50cm)	□	□	□	□	□	□
	C2-C3 (53-66cm)	□	□	+	□	□	□
Intervenido	AP (0-8cm)	++++	++++	□	□	□	++++
Tumbas	LF1 (25-37 cm)	□	++	□	□	□	□
Orobajo	LF2 (25-67 cm)	++	++	+	□	□	+
Tumbas	T. 045 (75cm)	+++	++	+	□	□	++
Réplica	T. 048 (182 cm)	++	++	+++	□	++++	++++
Orobajo	T. 013 (130 cm)	++	++	+++	□	+++	+++
	T. 020 (128 cm)	+++	++	□	□	++	++
Intervenido	Ap (10-22cm)	++	+++	□	□	□	□
Tumbas	LF1 (39-52cm)	□	+++	++	□	□	+++
Barbacoas	LF2 (52-100cm)	□	□	++++	□	□	++++
Natural	Ap (0-22cm)	□	□	□	□	□	++
Barbacoas	A (22-33cm)	□	□	□	□	□	++
	C2 (55-68cm)	□	□	□	□	□	+
Tumbas	T. 011 (94-106cm)	□	++	++	□	++++	+++
Réplica	T. 003 (99-108cm)	□	□	□	+	□	++++
Barbacoas	T. 003 (74cm)	□	+++	□	□	+++	+
	T. 003 (144cm)	+++	+++	+++	□	□	+++
	Ap (21-33cm)	□	□	□	□	□	□
Intervenido	LF(38-50cm)	+++	++++	□	□	+++	++
Tumbas	Ap (12-24cm)	++	□	□	□	□	+++
Fortuna	LF1 (30-42cm)	□	□	□	□	++++	++++
	LF2 (62-74cm)	+	□	++	□	□	++
Tumbas	T. 006 (153-158cm)	++++	□	++++	□	□	□
Réplica							
Fortuna							

(OPM: Orientación Paralela de Micras); (MH: Mezcla de Horizontes); (RF: Raíces Frescas); (H: Huesos); (M: Madera); (C: Coprolitos). (□: ninguno), (+: alguno < 5 % de área), (+: pocos 5-15 % de área), (+++: Frecuente 30-50 % de área), (++++: Abundante 50-70 % de área) ^a: Lámina delgada. Frecuencias relativas de elementos de acuerdo con Bullock *et al.* (1985).

CONCLUSIONES

Respecto a la utilidad del presente estudio dentro de los posibles contextos arqueológicos o forenses de los entierros, la micromorfología de suelos se puede acoplar con métodos de geología forense en la detección de alteraciones antrópicas por inhumaciones clandestinas de cuerpos. Estas técnicas pueden complementar las realizadas con metodologías no invasivas y potentes, en donde es posible la detección de pedoturbaciones antrópicas con el uso de *Ground Penetrating Radar* (GPR), tomografías eléctricas y sensores remotos. Dichas perturbaciones, posteriormente pueden ser documentadas desde la pedología, por medio de las observaciones micromorfológicas para confirmar la presencia de Necrosuelos (Fitzpatrick, 2004; Fitzpatrick *et al.*, 2009; Pringle *et al.*, 2012; Di Maggio, 2017; Sagripanti *et al.*, 2017).

Acorde con el objetivo planteado en este trabajo fue posible caracterizar propiedades micromorfológicas y químicas particulares en los Necrosuelos para definir rasgos y procesos pedo-anthropogénicos. Estos fueron los cambios estructurales y de organización a nivel microscópico en los suelos de los cementerios, tales como la translocación y mezcla de agregados pedogenéticos entre matrices no pedogenéticas, la ocurrencia de orientaciones paralelas de origen antrópico de minerales alargados y la presencia localizada y escasa de artefactos provenientes de los entierros. También las concentraciones altas de P, Fe y S al nivel de los entierros, fragmentos óseos, fragmentos de clavos de hierro y descomposición de los tejidos. Los rasgos observados en los Necrosuelos de estos tres cementerios en el bosque seco tropical en Colombia pueden proponerse como rasgos diagnósticos modelo para la identificación de entierros clandestinos. En particular para zonas que reúnan condiciones de contextos pedológicos, geomorfológicos y bioclimáticos similares y que serán útiles en la geociencia forense.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos sentida gratitud con las personas de la Dirección Ambiental, Social y Sostenibilidad del Proyecto Ituango, desde donde se promueve y financia este estudio, enmarcado en el Convenio de

Colaboración CT-2018-000981 entre la Universidad Nacional de Colombia y Las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. También sentidos agradecimientos a las personas de las comunidades, quienes con su apoyo y sensibilidad facilitaron las labores del Proyecto de Exhumación y traslado de los Cementerios de Orobajo, Barbacoas y Fortuna. También al M. en C. Jaime Diaz Ortega del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, por su enseñanza y apoyo en el laboratorio de microscopía edafológica, al Grupo de Paleosuelos del mismo Instituto, que enriqueció este estudio en las discusiones del seminario semanal, así como a los honorables y doctos árbitros y editores de La Revista Mexicana de Ciencias Geológicas por sus juiciosas lecturas y eruditas recomendaciones que contribuyeron en la búsqueda de la excelencia para la presentación de este manuscrito.

REFERENCIAS

- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., Babel, U., 1985, Handbook for Soil Thin Section Description: Wolverhampton, Waine Research Publications, 152 pp.
- Burns, A., Pickering, M. D., Green, K. A., Pinder, A. P., Gestsdóttir, H., Usai, M.-R., Keely, B. J., 2017, Micromorphological and chemical investigation of late-Viking age grave fills at Hofstaðir, Iceland: *Geoderma*, 306, 183-194, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.021>
- Caballero, J. H., Rendón, A., Gallego, J. J., Uasapud, N. V., 2016, Inter-Andean Cauca River Canyon, in: M. Hermelin (eds.), *en Landscapes and Landforms of Colombia*. World Geomorphological Landscapes: Cham, Springer, 155-166.
- Charzyński, P., Bednarek, R., Sołnowska, B., 2010, Characteristics of the soils of Toruń cemeteries, *en 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world*, U. für B. International Union of Soil Sciences (IUSS), Institut für Bodenforschung (ed.), 1-6, <<https://www.iuss.org/19thWCSS/Symposium/pdf/0874.pdf>>, consulta: 15 de abril de 2019.
- Charzyński, P., Bednarek, R., Świtoniak, M., Żołnowska, B., 2011, Ekranic Technosols and Urbic Technosols of Toruń Necropolis: *Geologija*, 53[4(76)], 179-185.
- Charzyński, P., Bednarek, R., Greinert, A., Hulisz, P., Uzarowicz, V., 2013, Classification of technogenic soils according to WRB system in the light of Polish experiences: *Soil Science Annual*, 64, 145-150, <https://doi.org/10.2478/ssa-2013-0023>
- Charzyński, P., Markiewicz, M., Majorek, M., Bednarek, R., 2015, Geochemical assessment of soils in the German Nazi concentration camp in Stutthof (Northern Poland): *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(sup1), 47-54, <https://doi.org/10.1080/00380768.2014.1000232>
- Courty, M.A., Goldberg, P., Macphail, R., 1989, *Soils and Micromorphology in Archaeology*: Cambridge, Cambridge University Press, <<https://www.thebritishacademy.ac.uk/pubs/proc/files/77p039.pdf>>, consulta: 16 de marzo de 2019.
- Di Maggio, R. M., 2017, *Pedology Applied to Forensics*, *en* Di Maggio, R.M., Barone, P.M (eds.), *Geoscientists at Crime Scenes: Switzerland*, Springer, pp. 31-51, https://doi.org/10.1007/978-3-319-58048-7_3
- Espinal T, L.S., 1985, Geografía ecológica del Departamento de Antioquia: zonas de vida y formaciones vegetales del Departamento de Antioquia: *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 38(1), 5-106.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2009, *Guía para la descripción de suelos*: Roma, Food and Agriculture Organization, 99 pp.
- Fitzpatrick, E.A., 1984, Principles of thin section preparation, *en* Fitzpatrick, E.A. (ed.), *Micromorphology of Soils*: Netherlands, Springer, 1-5, https://doi.org/10.1007/978-94-009-5544-8_1
- Fitzpatrick, R.W., 2004, Soil: *Forensic Analysis*, *en* Jamieson, A., Moenssens, A. (eds.), *Wiley Encyclopedia of Forensic Science*: Glasgow, John Wiley & Sons, Ltd., 1-14, <https://doi.org/10.1002/9780470061589.fsa096.pub2>
- Fitzpatrick, R.W., Raven, M.D., Forrester, S.T., 2009, A Systematic Approach to Soil Forensics: Criminal Case Studies Involving Transference from Crime Scene to Forensic Evidence, *en* Ritz, K., Dawson, L., Miller, D. (eds.), *Criminal and Environmental Soil Forensics: Switzerland*, Springer, 105-127, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9204-6_8

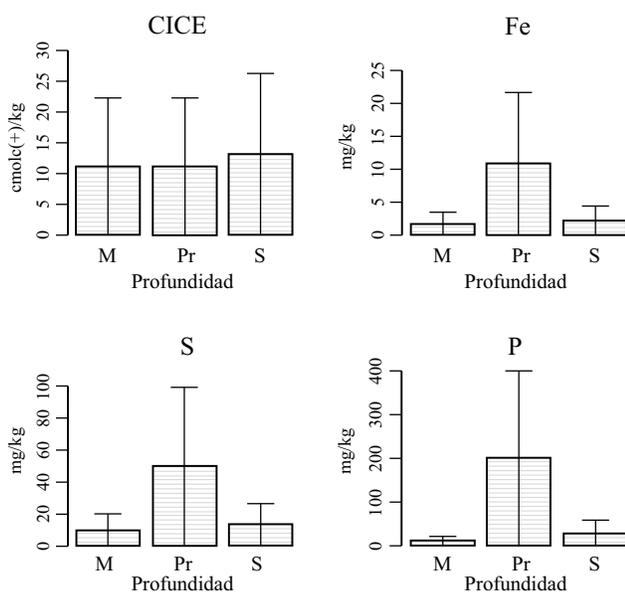


Figura 8. Diagrama de barras de propiedades químicas a nivel profundidades relativas de los suelos. S (0-20 cm), M (20-50 cm,) Pr (>50 cm).

- Gerasimova, M.I., Stroganova, M.N., Mozharova, N., Prokofyeva, T.V., 2003, Anthropogenic soils (genesis, geography, recovery): Moscow, Oikumena, Smolensk, 268 pp.
- Ghosh, S., Deb, S., Ow, L.F., Deb, D., Yusof, M.L., 2019, Soil characteristics in an exhumed cemetery land in Central Singapore: Environmental Monitoring and Assessment, 191(3), 174, <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7291-9>
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), 2006, Métodos analíticos del laboratorio de Suelos, 6th ed: Bogotá, Imprenta Nacional de Colombia, 648 pp.
- IUSS Working Group WRB, 2015, World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps: World Soil Resources Reports No. 106: Roma, FAO, 192 pp.
- Majgier, L., Rahmonov, O., 2012, Selected chemical properties of Necrosols from the abandoned cemeteries Słabowo and Szymonka (Great Mazurian Lakes District): Bulletin of Geography-Physical Geography Series, 5(1), 43-55, <https://doi.org/10.2478/v10250-012-0003-8>
- Massas, I., Kefalogianni, I., Chatzipavlidis, I., 2018, Is the ground of an old cemetery suitable for the establishment of an urban park? A critical assessment based on soil and microbiological data: Journal of Soils and Sediments, 18(1), 94-108, <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1726-0>
- Molina, C.M., Pringle, J.K., Saumett, M., Hernández, O., 2015, Preliminary results of sequential monitoring of simulated clandestine graves in Colombia, South America, using ground penetrating radar and botany: Forensic Science International, 248, 61-70, <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.12.011>
- Mordhorst, A., Zimmermann, I., Fleige, H., Horn, R., 2017, Changes in soil aeration and soil respiration of simulated grave soils after quicklime application: Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 180(2), 153-164, <https://doi.org/10.1002/jpln.201600351>
- Murray, R.C., 2004, Forensic geology: yesterday, today and tomorrow, en Croft, D.J., Pye, K. (eds.), Forensic Geoscience: Principles, Techniques and Applications: Londres, Geological Society Special Publications, 232, 7-9, <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.232.01.01>
- Nero, B.F., Anning, A.K., 2018, Variations in soil characteristics among urban green spaces in Kumasi, Ghana: Environmental Earth Sciences, 77(8), 317, <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7441-3>
- Pizano, C., Cabrera, M., García, H., 2014, Bosque seco tropical en Colombia: generalidades y contexto, en Pizano, C., García, H. (eds), El bosque seco tropical en Colombia: Bogotá, D.C, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 36-47.
- Pringle, J.K., Ruffell, A., Jervis, J.R., Donnelly, L., McKinley, J., Hansen, J., Harrison, M., 2012, The use of geoscience methods for terrestrial forensic searches: Earth-Science Reviews, 114(1-2), 108-123, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.05.006>
- Prokof'eva, T.V., Varava, O.A., Sedov, S.N., Kuznetsova, A.M., 2010, Morphological diagnostics of pedogenesis on the anthropogenically transformed floodplains in Moscow: Eurasian Soil Science, 43(4), 368-379, <https://doi.org/10.1134/S1064229310040022>
- Pye, K., Croft, D.J., 2004, Forensic geoscience: principles, techniques and application, London, Geological Society, 318 pp.
- Ruffell, A., 2010, Forensic pedology, forensic geology, forensic geoscience, geoforensics and soil forensics: Forensic Science International, 202, 9-12, <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.03.044>
- Ruffell, A., 2013, Forensic Geoscience, en Siegel, J.A, Saukko, P.J, Houck, M.M. (eds.), Encyclopedia of Forensic Sciences: Second Edition: Amsterdam, Elsevier, 213-216, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382165-2.00114-8>
- Sagara, N., Yamanaka, T., Tibbett, M., 2008, Soil fungi associated with graves and latrines: toward a forensic mycology. in Soil analysis in forensic taphonomy, en Tibbett, M. Carter, D.O. (eds), chemical and biological effects of buried human remains, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 67-108.
- Sagripanti, G.L., Villalba, D., Aguilera, D., Giaccardi, A., 2017, Avances de la geología forense en Argentina: búsqueda con métodos no invasivos de personas víctimas de desaparición forzada: Boletín de Geología, 39(3), 55-69, <https://doi.org/10.18273/revbol.v39n3-2017004>
- Sedov, S.N., Aleksandrovskii, A.L., Benz, M., Balabina, V.I., Mishina, T.N., Shishkov, V.A., Özkaya, V., 2017, Anthropogenic sediments and soils of tells of the Balkans and Anatolia: Composition, genesis, and relationships with the history of landscape and human occupation: Eurasian Soil Science, 50(4), 373-386, <https://doi.org/10.1134/S1064229317040093>
- Sobocká, J., 2004, Necrosol as a new anthropogenic soil type, en International Conference: Soil Anthropization VIII, Bratislava: Gagarinova, Jaroslava Sobocká, 107-113, <http://www.vupop.sk/dokumenty/ine_soil_anthropization8.pdf>, consulta: 09 de mayo de 2019.
- SSS (Soil Survey Staff), 2014, Keysto to Soil Taxonomy: Twelfth Edition United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 360 pp.
- Stroganova, M., Myagkova, A., Prokof'eva, T., Skvortsova, I., 1998, Soils of Moscow and urban environment: Moscú, publisher not identified, 168 pp.
- Suter, F., Martínez, J. I., Vélez, M. I., 2011, Holocene soft-sediment deformation of the Santa Fe-Sopetrán Basin, northern Colombian Andes: Evidence for pre-Hispanic seismic activity?: Sedimentary Geology, 235(3-4), 188-199, <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.09.018>
- Triana-Vega, A.V., Sedov, S., Salinas-Acero, J., Carvajal-Contreras, D., Moreano, C., Tovar-Reyes, M., Díaz-Ortega, J., 2018, Environmental reconstruction spanning the transition from hunter/gatherers to early farmers in Colombia: Paleopedological and archaeological indicators from the pre-ceramic sites Tequendama and Aguazuque: Quaternary International, S1040618218302787, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.09.048>
- Usai, M.R., Pickering, M.D., Wilson, C.A., Keely, B.J., Brothwell, D.R., 2014, Interred with their bones: soil micromorphology and chemistry in the study of human remains: Antiquity Project Gallery, 88, 339, <<http://www.antiquity.ac.uk/projgall/usai339/>>, consulta: 20 de mayo de 2019.
- Zimmermann, I., Fleige, H., Horn, R., 2016, Soil structure amelioration with quicklime and irrigation experiments in earth graves: Journal of Soils and Sediments, 16(11), 2514-2522, <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1509-z>

Manuscrito recibido: agosto 3, 2019

Manuscrito corregido recibido: junio 10, 2020

Manuscrito aceptado: junio 11, 2020