

## CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE LA MATERIA ORGÁNICA DE UN ANDISOL DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO, COLOMBIA<sup>a</sup>

## OPTICAL CHARACTERIZATION OF THE ORGANIC MATTER OF AN ANDISOL OF THE EAST OF ANTIOQUIA, COLOMBIA

NICOLÁS PÉREZ ECHAVARRÍA<sup>b</sup>, DANIEL JARAMILLO JARAMILLO<sup>c</sup>, ORLANDO RUIZ VILLADIEGO<sup>d</sup>, LUIS PARRA SÁNCHEZ<sup>e</sup>

Recibido 11-10-2017, aceptado 21-11-2017, versión final 24-11-2017.

Artículo Investigación

**RESUMEN:** Se realizó la caracterización óptica de la materia orgánica (MO) de un Andisol, obtenida en extracciones selectivas y secuenciales de Al, Fe y Si (cloruro de potasio, pirofosfato de sodio, oxalato ácido de amonio, ditionito-citrato-bicarbonato e hidróxido de sodio). A partir de las absorbancias se calculó la relación E4/E6, el  $\Delta \log K$ , el índice melánico (IM) y la densidad óptica del extracto de oxalato (ODOE). Los resultados de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$  y del IM en los extractos obtenidos con pirofosfato de sodio y con oxalato ácido de amonio mostraron un mayor grado de humificación para la materia orgánica extraída de los horizontes A y 2B/A y uno menor para la extraída de los horizontes 3C/A y 4Bs. El ODOE mostró la presencia de complejos orgánicos en los extractos obtenidos con pirofosfato de sodio e hidróxido de sodio y, la acumulación iluvial de óxidos e hidróxidos de Fe no cristalinos en el horizonte 4Bs en el extracto obtenido con oxalato ácido de amonio. En el horizonte A, los índices de humificación marcaron un cambio en el grado de evolución de la MO entre 8 y 10 cm de profundidad, lo cual podría indicar la presencia de una discontinuidad litológica o de un suelo enterrado.

**PALABRAS CLAVE:** Complejos orgánicos; evolución; extracciones selectivas de Al, Fe y Si; índices de humificación.

**ABSTRACT:** The optical characterization of the organic matter (OM) of an Andisol obtained from selective and sequential extractions of Al, Fe and Si (potassium chloride, sodium pyrophosphate, ammonium acid oxalate, dithionite-citrate-bicarbonate and sodium hydroxide) was made. The E4/E6 ratio, the  $\Delta \log K$ , the melanic index (MI) and the optical density of oxalate extract (ODOE) were calculated from the absorbances. The results of the E4/E6 ratio, the  $\Delta \log K$  and the MI in the extracts obtained with sodium pyrophosphate and with ammonium acid oxalate showed a higher degree of humification for the organic matter extracted from the A and 2B/A horizons and one smaller for the

<sup>a</sup>Pérez, N.; Jaramillo, D; Ruiz, O. & Parra, L. (2018). Caracterización óptica de la materia orgánica de un Andisol del Oriente Antioqueño, Colombia. *Rev. Fac. Cienc.*, 7(1), 40–55. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v7n1.68243>

<sup>b</sup>Ingeniero agrónomo, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. [npereze@unal.edu.co](mailto:npereze@unal.edu.co)

<sup>c</sup>Profesor titular y maestro universitario, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. [djaramal@unal.edu.co](mailto:djaramal@unal.edu.co)

<sup>d</sup>Profesor asociado, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. [osruiz@unal.edu.co](mailto:osruiz@unal.edu.co)

<sup>e</sup>Profesor asociado, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. [lnparra@unal.edu.co](mailto:lnparra@unal.edu.co)

one extracted from the 3C/A and 4Bs horizons. The ODOE showed the presence of organic complexes in the extracts obtained with sodium pyrophosphate and with sodium hydroxide and the iluvial accumulation of non-crystalline Fe oxides and hydroxides in the 4Bs horizon in the extract obtained with ammonium acid oxalate. In the horizon A, the humification indexes marked a change in the degree of evolution of the MO between 8 and 10 cm of depth, which could indicate the presence of a lithological discontinuity or of buried soil.

**KEYWORDS:** Organic complexes; evolution; selective extractions of Al, Fe and Si; humification indexes.

## 1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se realizó la caracterización óptica de la MO extraída secuencialmente de un Andisol con cloruro de potasio, pirofosfato de sodio, oxalato ácido de amonio, ditionito-citrato-bicarbonato e hidróxido de sodio. Para esto se utilizaron los valores de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$ , y del índice melánico (IM), como índices de humificación, y los del ODOE, como indicador de la formación de complejos orgánometalicos, con el fin de conocer el tipo de sustancias húmicas que predominan en cada uno de los horizontes del suelo y de comprobar si las variaciones de estos índices en profundidad permiten encontrar evidencias de cambios genéticos que en campo no son posibles de detectar.

## 2. MARCO TEÓRICO

Las sustancias húmicas son materiales amorfos, sin vestigios de la estructura original, de color oscuro y alto grado de transformación, que desde el punto de vista analítico se agrupan en ácidos fúlvicos (solubles en medio ácido y básico), ácidos húmicos (solubles en medio básico) y huminas (insolubles a cualquier pH) y que representan, en la mayoría de los casos, más del 50% de la materia orgánica total presente en el suelo (Zapata, 2006; Montero & Ortiz, 2013).

Los ácidos fúlvicos se diferencian de los ácidos húmicos por ser menos condensados, tener menor peso molecular y por poseer mayor cantidad de grupos funcionales oxigenados; así mismo son más jóvenes, más reactivos y más móviles, por lo que se consideran sustancias húmicas con bajo grado de evolución o de humificación (Jaramillo *et al.*, 2011). Por el contrario, los ácidos húmicos y las huminas al presentar un mayor grado de condensación, un mayor peso molecular y una mayor cantidad de compuestos aromáticos en sus estructuras, y por requerir un mayor tiempo para su formación, se consideran sustancias húmicas con alto grado de evolución o de humificación (Baglieri *et al.*, 2010).

Kumada (1987), aprovechando los espectros UV-VIS, ha propuesto un sistema de clasificación para los ácidos húmicos, teniendo como uno de los parámetros de caracterización el  $\Delta \log K$  [ $\log$  de la absorbancia a 400 nm ( $\log k 400$ ) –  $\log$  de la absorbancia a 600 nm ( $\log k 600$ )], donde a menor valor de  $\Delta \log K$  se tendrá mayor grado de humificación en las sustancias húmicas: valores de  $\Delta \log K$  menores a 0.6 son característicos

de ácidos húmicos tipo A, los cuales presentan un alto contenido de carbono aromático y un alto grado de humificación; valores entre 0.6 y 0.8 son propios de ácidos húmicos tipo B, los cuales presentan una menor aromaticidad y han alcanzado un grado intermedio de humificación y valores entre 0.8 y 1.1 son exclusivos de ácidos húmicos tipo Rp, los cuales muestran una predominancia de carbono alifático en sus estructuras y el menor grado de humificación.

La relación E4/E6 es una de las determinaciones que se realizan con mayor frecuencia. A un extracto obtenido de lavar una muestra de suelo con hidróxido de sodio (NaOH) que contiene las sustancias húmicas disueltas se le mide el grado de absorción de radiación (absorbancia) a dos longitudes de onda: 465 y 665 nm. El respectivo índice se define como el cociente entre la absorbancia a 465 nm y la absorbancia a 665 nm. Generalmente este índice permite diferenciar los ácidos húmicos de los fúlvicos. Se considera que valores superiores a cinco son propios de los ácidos fúlvicos, ya que mientras más compleja estructuralmente sea la molécula de la sustancia húmica, es decir, a medida que aumente el peso molecular y el contenido de carbono orgánico haciendo parte de estructuras aromáticas y altamente conjugadas, menor es el valor de la relación E4/E6 (Stevenson, 1982; Ruiz, 2003; Jaramillo *et al.*, 2011).

El índice melánico (IM) se determina extrayendo las sustancias húmicas del suelo con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) a la que se le mide la absorbancia a 450 y 520 nm, para calcular el índice como el cociente entre estas dos absorbancias (absorbancia a 450 nm/absorbancia a 520 nm). Un índice melánico (IM) menor o igual a 1.7 es característico del epipedón melánico que se desarrolla bajo cobertura de gramíneas y donde se acumulan sustancias húmicas tipo A, con un alto grado de humificación (SSS, 2014).

La densidad óptica del extracto obtenido con oxalato ácido de amonio (ODOE) equivale a medir su absorbancia a 430 nm. Un incremento en el valor del ODOE en un horizonte iluvial con respecto al valor del ODOE obtenido en el horizonte eluvial suprayacente, indica una acumulación de materiales orgánicos y Al, con o sin Fe, que se han trasladado dentro del suelo y permite definir un endopedón espódico (SSS, 2014).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Descripción y localización del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el Centro Agropecuario Paysandú de la Universidad Nacional de Colombia, ubicado en el corregimiento de Santa Elena, a una distancia de 18 km al Oriente de la ciudad de Medellín. Sus coordenadas geográficas son 6° 12' 37" de latitud Norte y 75° 30' 11" de longitud Oeste. Su área se estima en 139.3 ha. Ecológicamente, se encuentra en la zona de vida bosque muy húmedo montano bajo (bmh – MB), con una precipitación media anual de 2500 mm, con distribución bimodal, y una temperatura media anual de 14.7°C (De los Ríos *et al.*, 2004). El suelo estudiado está ubicado a 2692 msnm.

### 3.2. Muestreo del suelo

Para la caracterización de la fertilidad y de las propiedades ándicas del suelo se tomó de cada horizonte una muestra disturbada de aproximadamente 1 kg y para determinar la Densidad aparente ( $D_a$ ) de los mismos se tomó una muestra sin disturbar con un cilindro metálico de  $92.57 \text{ cm}^3$ .

Para la caracterización óptica de la materia orgánica se tomaron muestras cada centímetro y por triplicado en todo el horizonte A (0 – 14 cm), en todo el horizonte 2B/A (14 – 21 cm), en los dos primeros centímetros del horizonte 3C/A (21 – 23 cm) y en el primer centímetro del horizonte 4Bs (28 – 29 cm). Pese a que el muestreo del suelo fue al centímetro, por razones de costos y tiempo no se analizaron las muestras de todas las profundidades. Del horizonte A se utilizaron las muestras tomadas de 0 – 1 cm (M1), de 1 – 2 cm (M2), de 3 – 4 cm (M4), de 5 – 6 cm (M6), de 7 – 8 cm (M8), de 9 – 10 cm (M10), de 11 – 12 cm (M12) y de 13 – 14 cm (M14). Del horizonte 2B/A se utilizaron las muestras tomadas de 14 – 15 cm (M15), de 16 – 17 cm (M17), de 18 – 19 cm (M19) y de 20 – 21 cm (M21). Del horizonte 3C/A se utilizaron las muestras tomadas de 21 – 22 cm (M22) y de 22 – 23 cm (M23) y del 4Bs se utilizaron las muestras tomadas de 28 – 29 cm (M29) (ver Figura 1).

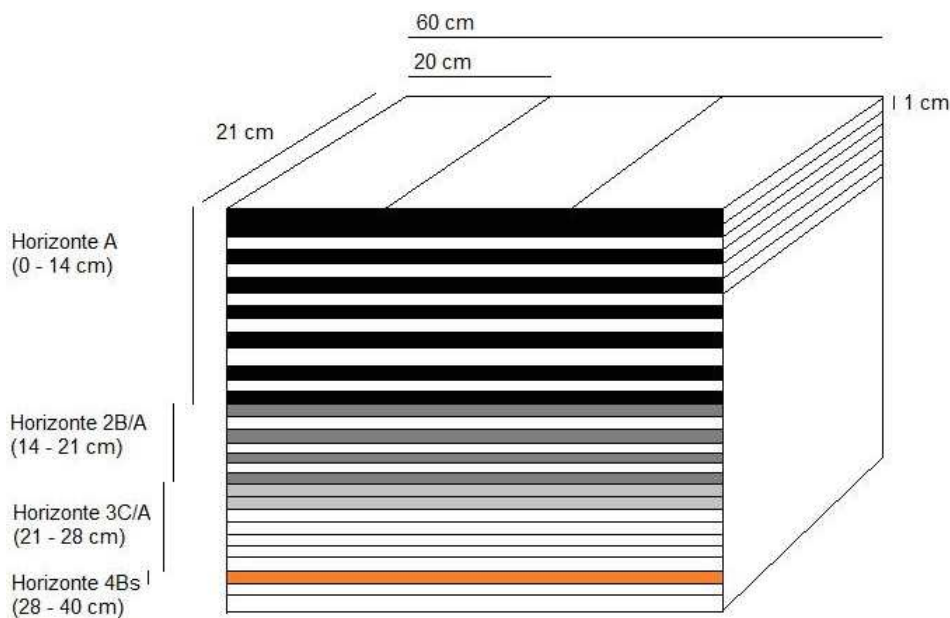


Figura 1: Esquema de muestreo del suelo y de las profundidades utilizadas para la caracterización óptica de la materia orgánica.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3. Caracterización de la fertilidad y de las propiedades ándicas del suelo

Para caracterizar la fertilidad del suelo se realizaron las siguientes determinaciones: pH en agua 1:1 volumen: volumen (método potenciométrico), contenido de materia orgánica (MO en %, método de Walkley-Black),

contenidos de bases intercambiables (Ca, Mg, K y Na, cmol (+)/kg de suelo) mediante extracción con acetato de amonio 1 N a pH 7, fósforo disponible (P, mg/kg de suelo) por el método de Bray II y aluminio intercambiable (Al, cmol (+)/kg de suelo) extraído con KCl 1 N (IGAC, 2006).

Para caracterizar las propiedades ándicas del suelo se midieron las cantidades de Al, Fe y Si extractables con oxalato ácido de amonio (Alo, Feo, Sio, respectivamente, %), así como las extractables con pirofosfato de sodio (Alp, Fep, Sip, respectivamente, %), y la capacidad de fijación de fosfatos (FF, %). También se determinó la Da ( $\text{Mg/m}^3$ ) para cada uno de los horizontes, utilizando el método del cilindro biselado (IGAC, 2006).

### **3.4. Caracterización óptica de la materia orgánica obtenida en las extracciones selectivas y secuenciales**

Las muestras de suelo fueron sometidas a extracciones selectivas realizadas secuencialmente con cloruro de potasio, pirofosfato de sodio, oxalato ácido de amonio, ditionito-citrato-bicarbonato e hidróxido de sodio. En los extractos obtenidos se determinaron las absorbancias a 400 nm, 430 nm, 450 nm, 465 nm, 520 nm, 600 nm y 665 nm con un espectrofotómetro UV/VIS PerkinElmer Lambda 25 (ver Figura 2).

### **3.5. Manejo estadístico de los datos**

El manejo estadístico de los datos se realizó con el programa R versión 3.2.2. Para cada uno de los índices establecidos se calcularon los estadísticos básicos: Media, valor Mínimo y valor Máximo; y se hicieron comparaciones entre los valores promedios de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$ , del IM y del ODOE obtenidos en cada una de las profundidades del Andisol con el método no paramétrico de comparación de medias por rangos de Kruskal Wallis.

## **4. RESULTADOS**

### **4.1. Caracterización de la fertilidad y de las propiedades ándicas del suelo**

El suelo estudiado presentó un bajo contenido de bases y de fósforo disponible, una baja capacidad de intercambio catiónico (CICE) y una alta acidez, lo que indica un bajo nivel de fertilidad natural. El alto contenido de materia orgánica superficial está en concordancia con el clima frío húmedo de la zona y con la formación de complejos organometálicos que la protegen de la mineralización. Los horizontes superficiales del perfil se clasificaron como no alofánicos mientras que los horizontes subsuperficiales se clasificaron como alofánicos. El suelo mostró evidencias de ser poligenético, así como de fenómenos de erosión asociados a cambios climáticos drásticos y fue clasificado como un Acrudoxic Fulvudand, medial, mezclado, isotérmico

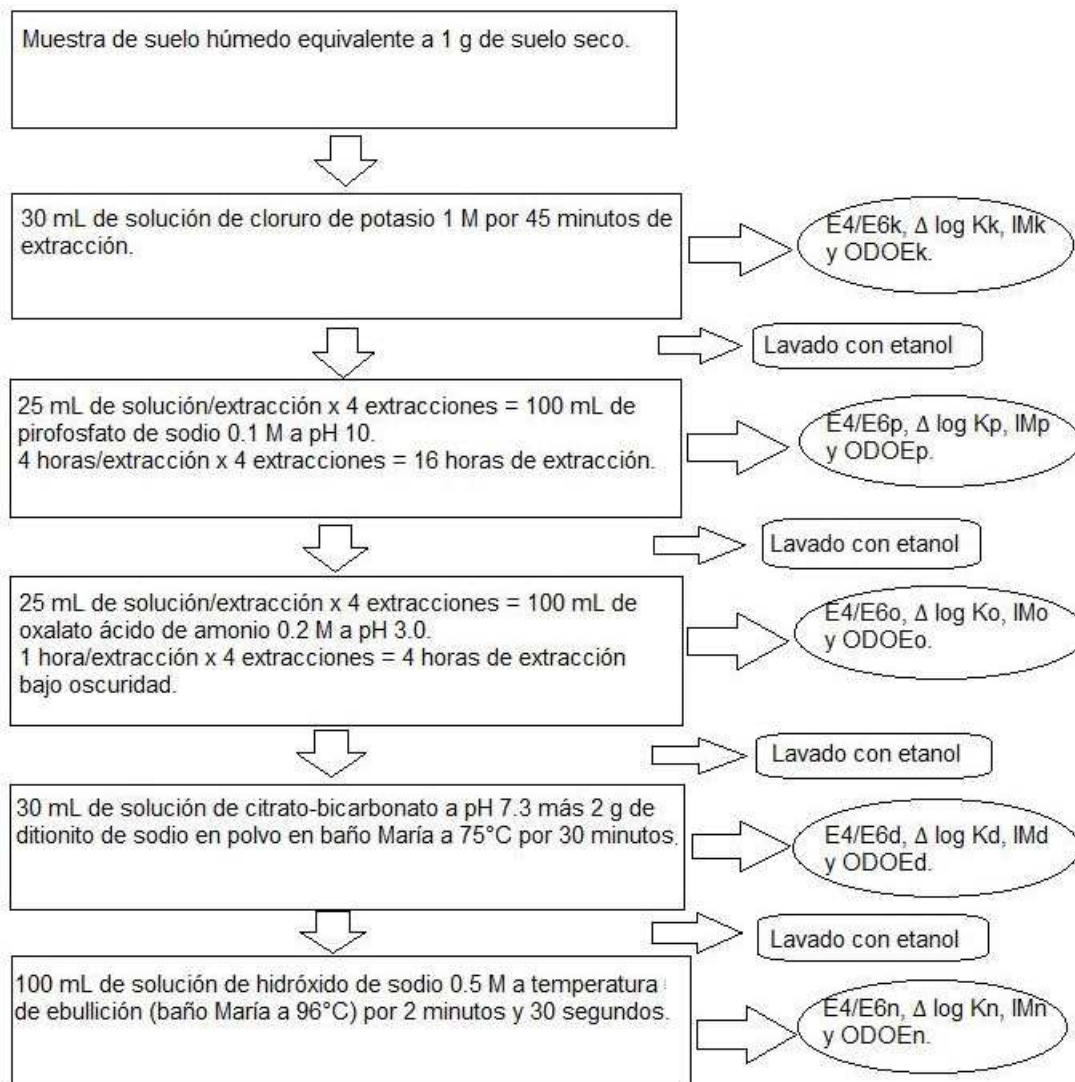


Figura 2: Esquema del procedimiento utilizado para la caracterización óptica de la materia orgánica. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Dai *et al.* (2011) y Asano & Wagai (2014).

(ver Tabla 1).

En la Figura 3, se pueden observar los colores de los extractos obtenidos secuencialmente con KCl, pirofosfato de sodio, oxalato ácido de amonio, ditionito-citrato-bicarbonato e hidróxido de sodio en muestras de suelo tomadas de los horizontes A, 2B/A, 3C/A y 4Bs.

En la Figura 4, se muestra el comportamiento de los cuatro índices medidos con cada uno de los extractantes utilizados secuencialmente.

Tabla 1: Algunas propiedades químicas y ándicas de los horizontes A, 2B/A, 3C/A y 4Bs del suelo.

	pH	MO %	Ca cmol (+)/kg de suelo	Mg	K	Na	Al	CICE	P mg/kg de suelo	Al <sub>o</sub> +1/2Fe <sub>o</sub> %	FF %	Da Mg/m <sup>3</sup>
A	4.5	22.6	0.09	0.16	0.10	0.02	1.2	1.6	3.0	2.05	94.91	0.65
2B/A	4.7	19.5	0.03	0.08	0.06	0.02	2.8	3.0	2.0	4.88	98.71	0.65
3C/A	5.0	13	0.03	0.02	0.03	0.01	1.2	1.3	1.0	9.65	98.89	0.66
4Bs	5.1	8.7	0.02	0.02	0.02	0.01	0.4	0.5	2.0	11.36	98.95	0.56

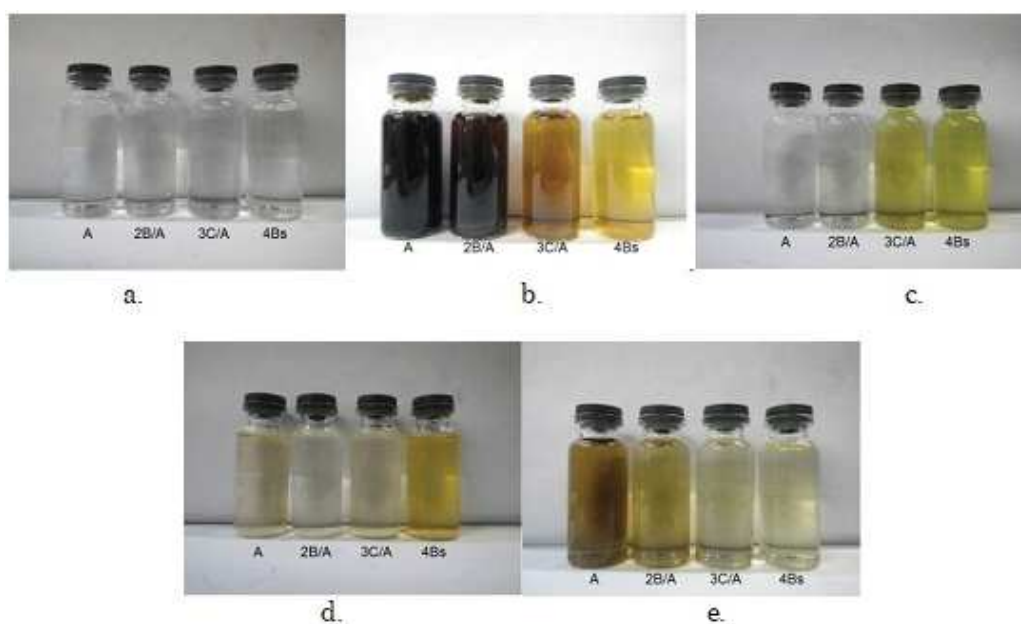


Figura 3: Extractos obtenidos secuencialmente con KCl (a), pirofosfato de sodio (b), oxalato ácido de amonio (c), ditionito-citrato-bicarbonato (d) e hidróxido de sodio (e) de muestras de suelo tomadas en los horizontes A, 2B/A, 3C/A y 4Bs.

Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. Extracción con KCl

En la Tabla 2, se presentan los valores de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$ , del IM y del ODOE obtenidos con KCl. En la mayoría de profundidades estudiadas estos índices presentaron valores muy bajos. Sin embargo, si se tiene en cuenta la claridad de los extractos y lo reportado en la mayoría de investigaciones puede afirmarse que es muy poco probable que este reactivo haya extraído compuestos orgánicos con un alto grado de humificación tal como lo indican García *et al.* (2004) y Jansen *et al.* (2011); por lo tanto, los resultados conseguidos para estos índices se podrían deber más a las características químicas propias de la solución de KCl y/o a la presencia de cationes intercambiables como el Al<sup>+3</sup> y el Fe<sup>+3</sup>, hecho que puede corroborarse

en investigaciones publicadas por Weishaar *et al.* (2003) y Strack *et al.* (2015).

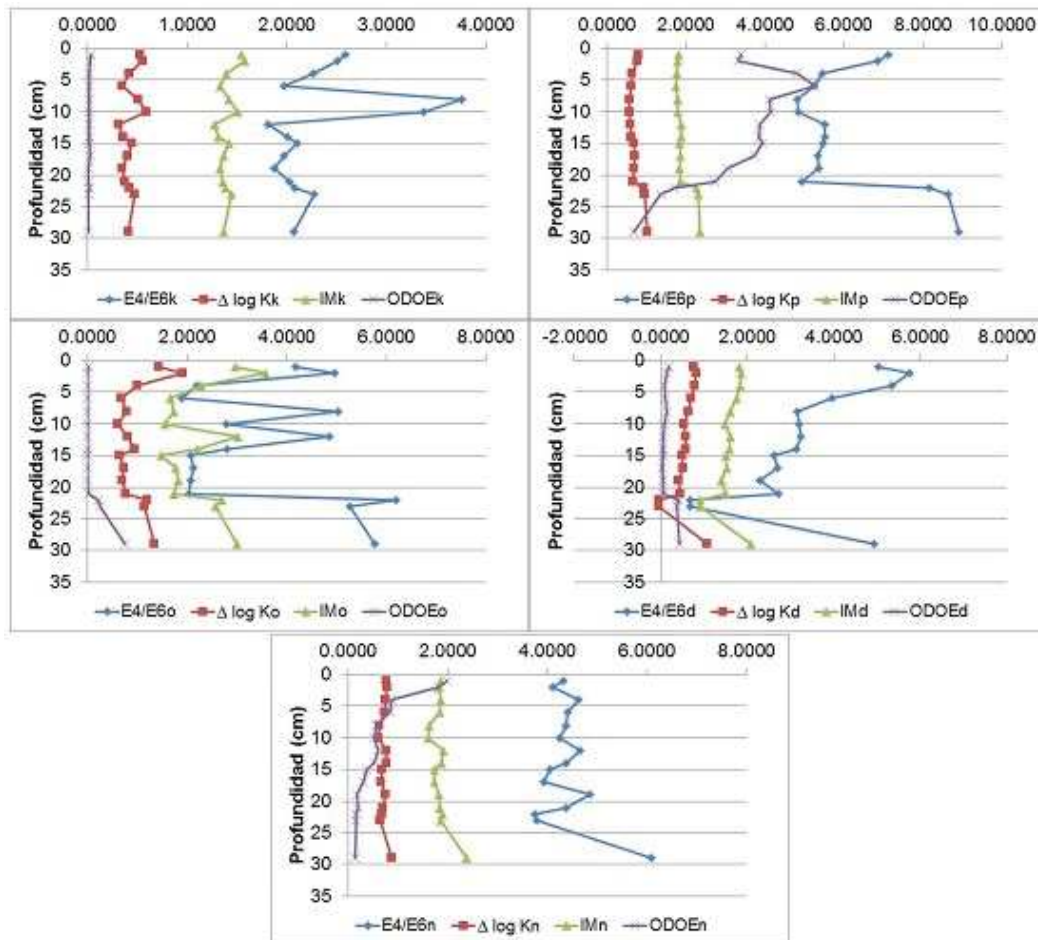


Figura 4: Comportamiento de los cuatro índices medidos con cada uno de los extractantes en los primeros 30 cm del suelo. Fuente: Elaboración propia.

### 4.3. Extracción con pirofosfato de sodio

En la Tabla 3, se presentan los valores de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$ , del IM y del ODOE obtenidos en la extracción con pirofosfato de sodio. Los colores pardos y oscuros de los extractos indican que este reactivo fue el que más materia orgánica extrajo del suelo (ver Figura 3).

Las tendencias de la relación E4/E6p, del  $\Delta \log Kp$  y del IMp a través de todo el perfil fueron muy similares entre sí y muestran un mayor grado de humificación para la materia orgánica extraída de los horizontes A y 2B/A y uno menor para la extraída de los horizontes 3C/A y 4Bs (Figura 4), en los dos primeros horizontes se favorece la formación de complejos Al/Fe-humus (no alofánicos) y en los dos segundos la formación de



Tabla 2: Valores de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$ , del IM y del ODOE obtenidos en la extracción con KCl (valores que no presenten letras comunes en la misma columna indican diferencia estadísticamente significativa entre medias, por profundidad, con un 95 % de confianza (el valor de la letra es descendente, se asigna la a para el valor más alto)).

Horizonte	Muestra	E4/E6k	$\Delta \log Kk$	IMk	ODOEk
A	M1	2.59 ab	0.53 a	1.54 ab	0.037 a
	M2	2.51 ab	0.55 a	1.58 a	0.025 ab
	M4	2.27 bc	0.42 cde	1.39 cde	0.021 bcd
	M6	1.98 de	0.35 ghi	1.33 efg	0.019 bcde
	M8	3.75 a	0.51 ab	1.42 cde	0.022 bcd
	M10	3.37 a	0.59 a	1.51 abc	0.016 cdef
	M12	1.81 f	0.31 i	1.28 g	0.023 bc
	M14	2.00 de	0.36 fg	1.32 fg	0.019 bcd
2B/A	M15	2.11 cd	0.45 bcd	1.42 bcd	0.021 bcd
	M17	1.97 def	0.41 defg	1.37 def	0.026 ab
	M19	1.87 ef	0.35 hi	1.33 fg	0.008 g
	M21	2.03 de	0.38 efgh	1.36 def	0.011 fg
3C/A	M22	2.08 cd	0.42 cde	1.39 cde	0.016 def
	M23	2.28 bc	0.47 abc	1.45 abc	0.013 efg
4Bs	M29	2.07 d	0.41 cdef	1.37 def	0.012 fg

coloides inorgánicos no cristalinos (alofánicos), lo que inhibe la producción de compuestos húmicos con estructuras complejas, autores como Zapata (2006) y Takahashi & Dahlgren (2016) también reportan resultados similares.

En los horizontes A y 2B/A los valores del ODOE<sub>p</sub> fueron altos, mientras que en los horizontes 3C/A y 4Bs fueron bajos, lo que puede estar mostrando que en esta extracción los valores del ODOE se ven afectados por la concentración que presenta la materia orgánica disuelta en dichos extractos ( ver Figura 4).

#### 4.4. Extracción con oxalato ácido de amonio

En la Tabla 4, se presentan los valores de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$ , del IM y del ODOE obtenidos en la extracción con oxalato ácido de amonio. Los colores de los extractos están mostrando que este reactivo extrajo muy poca materia orgánica en los horizontes A y 2B/A y que pudo disolver una mayor cantidad de sustancias húmicas en los horizontes 3C/A y 4Bs. También es posible que el color de los extractos en los horizontes 3C/A y 4Bs se deba a la presencia de cationes como el Al, Fe y Si provenientes de la disolución de los coloides inorgánicos no cristalinos (ver Figura 3).

Los incrementos y las disminuciones alternadas en los valores de la relación E4/E6<sub>o</sub>, del  $\Delta \log K_o$  y del IM<sub>o</sub> en el horizonte A indican una alta variabilidad en el grado de humificación de la materia orgánica extraída

Tabla 3: Valores de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$ , del IM y del ODOE obtenidos en la extracción con pirofosfato de sodio (valores que no presenten letras comunes en la misma columna indican diferencia estadísticamente significativa entre medias, por profundidad, con un 95 % de confianza (el valor de la letra es descendente, se asigna la a para el valor más alto)).

Horizonte	Muestra	E4/E6p	$\Delta \log K_p$	IMp	ODOEp	
A	M1	7.13 ab	0.80 cd	1.82 ef	3.38 e	
	M2	6.86 b	0.78 d	1.79 fg	3.33 e	
	M4	5.44 c	0.65 f	1.77 gh	4.82 ab	
	M6	5.24 cd	0.62 g	1.74 h	5.28 a	
	M8	4.82 e	0.56 i	1.80 fg	4.12 c	
	M10	4.84 e	0.56 i	1.80 fg	4.15 bc	
	M12	5.52 c	0.60 h	1.87 bcd	3.86 d	
	M14	5.51 c	0.61 gh	1.88 bc	3.85 d	
	2B/A	M15	5.47 c	0.69 e	1.84 cde	3.94 cd
		M17	5.33 c	0.70 e	1.86 cd	3.72 d
M19		5.36 c	0.69 e	1.83 de	3.05 ef	
M21		4.93 de	0.66 f	1.85 de	2.73 fg	
3C/A	M22	8.15 ab	0.93 bc	2.26 ab	1.69 gh	
	M23	8.64 a	0.96 ab	2.31 a	1.36 hi	
4Bs	M29	8.90 ab	1.02 a	2.35 a	0.68 i	

por el oxalato ácido de amonio. Los resultados obtenidos para estos tres parámetros en el horizonte 2B/A pueden relacionarse con la presencia de sustancias húmicas con un grado de evolución mayor al de la fracción orgánica solubilizada en los primeros centímetros del horizonte A y con una composición química más homogénea. Por último, los aumentos que presentaron estos mismos índices en los horizontes 3C/A y 4Bs están indicando, al igual que la relación E4/E6p, que el  $\Delta \log K_p$  y que el IMp, una disminución en el grado de humificación de las sustancias orgánicas solubilizadas en estos dos últimos horizontes (ver Figura 4).

En los horizontes A y 2B/A los valores obtenidos para el ODOEo fueron muy bajos posiblemente debido al tratamiento previo que recibieron las muestras con pirofosfato de sodio. Por el contrario, en los horizontes 3C/A y 4Bs el incremento en los valores del ODOEo podría deberse a la presencia del Al, Fe y Si provenientes de la disolución de coloides inorgánicos no cristalinos (ver Figura 4).

#### 4.5. Extracción con ditionito-citrato-bicarbonato

En la Tabla 5, se presentan los valores de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$ , del IM y del ODOE obtenidos en la extracción con ditionito-citrato-bicarbonato. Los colores de los extractos indican que este reactivo extrajo poca materia orgánica en los horizontes A, 2B/A y 3C/A y un poco más de materia orgánica en el horizonte 4Bs, aunque también podría pensarse que el color del extracto obtenido en este último horizonte puede estar influenciado por la presencia del Fe en solución (ver Figura 3).

Tabla 4: Valores de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$ , del IM y del ODOE obtenidos en la extracción con oxalato ácido de amonio (valores que no presenten letras comunes en la misma columna indican diferencia estadísticamente significativa entre medias, por profundidad, con un 95 % de confianza (el valor de la letra es descendente, se asigna la a para el valor más alto)).

Horizonte	Muestra	E4/E6o	$\Delta \log K_o$	IMo	ODOEo
A	M1	4.17 a	1.43 ab	2.96 ab	0.014 cd
	M2	4.97 a	1.91 a	3.58 a	0.010 de
	M4	2.19 b	1.00 cdef	2.29 abcde	0.006 gh
	M6	1.90 b	0.68 gh	1.66 def	0.009 e
	M8	5.03 ab	0.78 fgh	1.74 cdef	0.006 fg
	M10	2.79 ab	0.62 h	1.55 ef	0.006 g
	M12	4.86 a	0.80 efgh	3.01 bcdef	0.004 h
	M14	2.81 ab	0.95 defg	2.21 abcde	0.005 gh
2B/A	M15	2.07 b	0.65 h	1.48 f	0.008 ef
	M17	2.12 b	0.74 fgh	1.77 cdef	0.007 fg
	M19	2.06 b	0.70 gh	1.82 def	0.010 de
	M21	2.03 b	0.77 efgh	1.73 def	0.017 bc
3C/A	M22	6.19 a	1.19 abcd	2.70 abc	0.215 abc
	M23	5.27 a	1.15 bcde	2.56 abcd	0.257 ab
4Bs	M29	5.77 a	1.35 abc	3.01 ab	0.748 a

Los valores de la relación E4/E6d obtenidos en todo el perfil están indicando que la materia orgánica extraída presenta una composición química más afín a la de los ácidos húmicos que a la de los ácidos fúlvicos y que el grado de humificación de la misma tiene la tendencia a incrementarse en profundidad hasta el horizonte 3C/A donde este reactivo extrajo las sustancias húmicas con mayor grado de humificación de todo el suelo. En el horizonte 4Bs se presentó un incremento en la relación E4/E6d relacionado con una disminución en el grado de humificación de las sustancias húmicas solubilizadas, las cuales también muestran una composición química más afín a la de los ácidos húmicos y un grado de evolución similar al obtenido para la fracción orgánica que se disolvió en los primeros centímetros del horizonte A (Stevenson, 1982; Ruiz, 2003; Jaramillo *et al.*, 2011). Los valores de  $\Delta \log K_d$  y del IMd también presentaron una tendencia muy similar a la de la relación E4/E6d a través de todas las profundidades estudiadas en el perfil (ver Figura 4).

En los horizontes A y 2B/A los valores del ODOEd fueron muy bajos debido, posiblemente, a las extracciones previas que se realizaron con pirofosfato de sodio y con oxalato ácido de amonio. En cambio en los horizontes 3C/A y 4Bs, el incremento en los valores del ODOEd se puede deber a un pequeño aumento en la cantidad de sustancias húmicas extraídas y/o en la cantidad de Fe liberado de los óxidos e hidróxidos y de otros complejos organometálicos que no se alcanzaron a disolver en las extracciones previas (ver Figura 4).

Tabla 5: Valores de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$ , del IM y del ODOE obtenidos en la extracción con ditionito-citrato-bicarbonato (valores que no presenten letras comunes en la misma columna indican diferencia estadísticamente significativa entre medias, por profundidad, con un 95 % de confianza (el valor de la letra es descendente, se asigna la a para el valor más alto)).

Horizonte	Muestra	E4/E6d	$\Delta \log Kd$	IMd	ODOEd
A	M1	5.01 ab	0.76 bc	1.80 bc	0.176 bc
	M2	5.76 a	0.81 ab	1.86 ab	0.131 c
	M4	5.34 ab	0.77 b	1.84 abc	0.083 d
	M6	3.94 b	0.70 cd	1.75 cd	0.088 d
	M8	3.14 cd	0.64 de	1.61 de	0.134 c
	M10	3.18 c	0.53 gh	1.49 gh	0.081 d
	M12	3.24 c	0.58 ef	1.61 e	0.060 e
	M14	3.13 c	0.56 efg	1.58 ef	0.050 g
2B/A	M15	2.62 ef	0.49 hi	1.49 gh	0.052 fg
	M17	2.70 de	0.51 fgh	1.53 fg	0.039 h
	M19	2.29 fg	0.40 jk	1.39 hi	0.059 ef
	M21	2.71 e	0.45 ij	1.49 g	0.047 g
3C/A	M22	0.67 g	-0.04 k	0.90 i	0.401 a
	M23	0.68 g	-0.04 k	0.89 i	0.370 ab
4Bs	M29	4.92 ab	1.06 a	2.08 a	0.436 a

#### 4.6. Extracción con hidróxido de sodio

En la Tabla 6, se presentan los valores de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$ , del IM y del ODOE obtenidos en la extracción con hidróxido de sodio. Los colores de los extractos están indicando que este reactivo extrajo un poco más de materia orgánica en los horizontes A y 2B/A que en los horizontes 3C/A y 4Bs (ver Figura 3).

Los valores obtenidos para la relación E4/E6n, para el  $\Delta \log Kn$  y para el IMn están mostrando un grado de humificación entre medio y alto para la materia orgánica extraída de los horizontes A, 2B/A y 3C/A. En el horizonte 4Bs, por el contrario, los altos valores obtenidos para estos mismos parámetros son propios de ácidos fúlvicos y se asocian con un bajo grado de humificación en la fracción orgánica acumulada en el suelo a esta profundidad, probablemente relacionado con unas condiciones ambientales menos húmedas que las dominantes cuando se estaba desarrollando el suelo suprayacente, así también lo indica Strack *et al.* (2015).

El ODOEn tendió a decrecer en profundidad a través de todo el perfil. En el horizonte A se presentaron los mayores valores para este parámetro, mientras que en los horizontes 3C/A y 4Bs se presentaron los valores más bajos. Estos resultados pueden estar mostrando que la cantidad de materia orgánica solubilizada en el suelo, después de los lavados con los extractantes considerados, decreció en profundidad y que al igual que el ODOEp, los valores de ODOEn se ven afectados por la concentración que presenta la materia orgánica disuelta en los extractos.

Tabla 6: Valores de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$ , del IM y del ODOE obtenidos en la extracción con hidróxido de sodio (valores que no presenten letras comunes en la misma columna indican diferencia estadísticamente significativa entre medias, por profundidad, con un 95 % de confianza (el valor de la letra es descendente, se asigna la a para el valor más alto)).

Horizonte	Muestra	E4/E6n	$\Delta \log K_n$	IMn	ODOEn
A	M1	4.32 bcde	0.77 bc	1.86 bcd	1.99 a
	M2	4.10 cdef	0.79 ab	1.83 def	1.82 a
	M4	4.62 ab	0.76 cd	1.86 bcd	0.88 b
	M6	4.41 bc	0.74 de	1.84 cd	0.85 b
	M8	4.37 bcd	0.63 h	1.63 g	0.57 cd
	M10	4.26 bcd	0.62 h	1.61 g	0.52 d
	M12	4.65 ab	0.78 bc	1.91 ab	0.61 c
	M14	4.36 bcd	0.76 bcd	1.88 bcd	0.52 d
2B/A	M15	4.05 cdef	0.68 fg	1.74 efg	0.37 e
	M17	3.92 ef	0.67 fg	1.73 fg	0.31 ef
	M19	4.86 ab	0.75 cd	1.83 cde	0.18 gh
	M21	4.38 bc	0.70 ef	1.85 cd	0.20 fg
3C/A	M22	3.74 f	0.68 fg	1.89 abc	0.17 hi
	M23	3.78 def	0.64 gh	1.86 bcd	0.16 ij
4Bs	M29	6.09 a	0.88 a	2.37 a	0.15 j

#### 4.7. Resultados de la relación E4/E6, del $\Delta \log K$ y del IM dentro del horizonte A

En la Figura 5, se puede ver que dentro del horizonte A los valores de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$  y del IM en los extractos obtenidos con pirofosfato de sodio, con ditionito-citrato-bicarbonato y con hidróxido de sodio, están mostrando, en general, un incremento en el grado de humificación de la materia orgánica a través de los primeros 8 o 10 cm del suelo, y una disminución en el grado de humificación de la misma a partir de estos puntos y hasta los 14 cm de profundidad.

Los cambios en las tendencias de estos tres índices de humificación son muy similares y se podrían deber posiblemente a variaciones en la composición química de las capas de ceniza, en el tipo de vegetación aportada al suelo y/o en las condiciones ambientales en las que se desarrolló el proceso de humificación (principalmente humedad y temperatura), lo que pudo promover la formación de sustancias húmicas con un menor grado de evolución entre los 8 o 10 cm y los 14 cm de profundidad. Esta disminución en el grado de humificación de la materia orgánica podría estar indicando la presencia de un suelo enterrado o de una discontinuidad litológica y ayudaría a justificar la hipótesis de que este horizonte puede dividirse en dos horizontes diferentes comprendidos entre la superficie del suelo y los 8 o 10 cm de profundidad y entre los 8 o 10 cm y los 14 cm de profundidad. Es importante resaltar que esta distinción no se pudo realizar en campo debido a la falta de evidencias macromorfológicas.

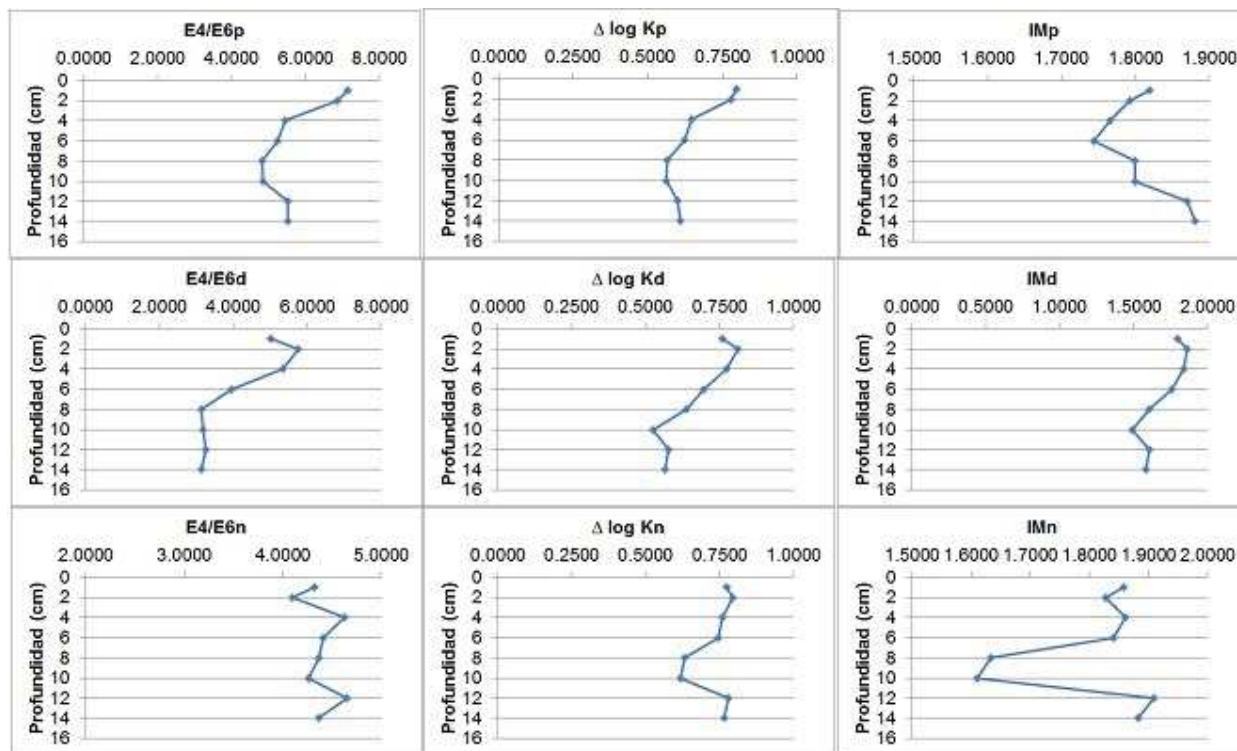


Figura 5: Comportamientos de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$  y del IM en los extractos obtenidos con pirofosfato de sodio, con ditionito-citrato-bicarbonato y con hidróxido de sodio dentro del horizonte A. Fuente: Elaboración propia.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$  y del IM en los extractos obtenidos con pirofosfato de sodio y con oxalato ácido de amonio, en general están mostrando un mayor grado de humificación para la materia orgánica extraída de los horizontes A y 2B/A y uno menor para la extraída de los horizontes 3C/A y 4Bs. Estos índices coinciden en su capacidad para identificar diferentes grados de humificación.

El ODOE fue un indicador eficiente de la presencia de complejos orgánicos en los extractos obtenidos con pirofosfato de sodio y con hidróxido de sodio e identificó acertadamente la acumulación iluvial de óxidos e hidróxidos de Fe no cristalinos en el horizonte 4Bs en el extracto obtenido con oxalato ácido de amonio.

Las tendencias de los valores de la relación E4/E6, del  $\Delta \log K$  y del IM en los extractos obtenidos con pirofosfato de sodio, con ditionito-citrato-bicarbonato y con hidróxido de sodio permiten pensar que el horizonte A podría dividirse en dos horizontes diferentes que no fueron diferenciables en campo, comprendidos entre la superficie del suelo y los 8 o 10 cm de profundidad y entre los 8 o 10 cm y los 14 cm de profundidad.

Como recomendación, a pesar de que el KCl aparentemente extrajo los compuestos orgánicos más humificados y aunque en la literatura se atribuye parte de este comportamiento a la posibilidad que tiene esta sal de extraer iones intercambiables, debe confirmarse esta alternativa con futuras investigaciones.

## Referencias

- Asano, M. & Wagai, R. (2014). Evidence of aggregate hierarchy at micro-to submicron scales in an allophanic Andisol. *Geoderma*, 216, 62-74.
- Baglieri, A.; Ioppolo, A.; Négre, M.; Abbate, C. & Gennari, M. (2010). Characterization of glycerol-extractable organic matter from Etna soils of different ages. *Pedosphere*, 20(1), 120-128.
- Dai, Q.; Ae, N.; Suzuki, T.; Rajkumar, M.; Fukunaga, S. & Fujitake, N. (2011). Assessment of potentially reactive pools of aluminum in Andisols using a five-step sequential extraction procedure. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57(4), 500-507.
- De los Ríos, J.C.; Gallego, A.F.; Vélez, L.D.; Agudelo, J.I.; Toro, L.J.; Lema, A.J. & Acevedo, L.I. (2004). Caracterización y evaluación de agroecosistemas a escala predial. Un estudio de caso: Centro Agropecuario Paysandú (Medellín, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 57 (2), 2467-2489.
- García, E.; Nóvoa, J.; Pontevedra, X.; Martínez, A. & Buurman, P. (2004). Aluminium fractionation of European volcanic soils by selective dissolution techniques. *Catena*, 56(1), 155-183.
- IGAC, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos (6ª ed.)*. Bogotá: Imorenta Nacional, 648 p.
- Jansen, B.; Tonneijck F.H. & Verstraten, J.M. (2011). Selective extraction methods for aluminium, iron and organic carbon from montane volcanic ash soils. *Pedosphere*, 21(5), 549-565.
- Jaramillo, D.F. (2011). Caracterización de la materia orgánica del horizonte superficial de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño (Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35(134), 23-33.
- Kumada, K. (1987). *Chemistry of soil organic matter*. Tokio: Japan Scientific Societies Press, 240 p.
- Montoya, J.C.; Menjivar, J.C. & Bravo, I. (2013). Fraccionamiento y cuantificación de la materia orgánica en Andisoles bajo diferentes sistemas de producción. *Acta Agronómica*, 62 (4), 333-343.
- Ruiz, O. (2003). *Sustancias húmicas e índices de humificación*. En: Memorias Seminario Materiales Orgánicos en la Agricultura. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Comité Regional de Antioquia. Medellín. CD-Room. 13 p.

- SSS, Soil Survey Staff. (2014). *Keys to soil taxonomy (12<sup>th</sup> ed.)*. Washington D.C.: USDA, 360 p.
- Stevenson, F. (1982). *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. New York: Wiley, 443 p.
- Strack, M.; Zuback, Y.; Mc Carter, C. & Price, J. (2015). Changes in dissolved organic carbon quality in soils and discharge 10 years after peatland restoration. *Journal of Hydrology*, 527, 345-354.
- Takahashi, T & Dahlgren, R. (2016). Nature, properties and function of aluminum humus complexes in volcanic soils. *Geoderma*, 263, 110-121.
- Weishaar, J.; Aiken, G.; Bergamaschi, B.; Fram, M.; Fuji, R. & Mopper, K. (2003). Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. *Environmental Science. and Technology*, 37(20), 4702-4708.
- Zapata, R. D. (2006). *Química de los procesos pedogenéticos*. Medellín. Universidad Nacional de Colombia, 358 p.