

El color como indicador de contaminación por metales pesados en suelos de la Ciudad de México

Color as a proxy for heavy metal pollution in soils of Mexico City

Francisco Bautista^{1,*}, Avto Goguitchaichvili², Carmen Delgado², Patricia Quintana³, Daniel Aguilar³, Rubén Cejudo², José Luis Cortés¹

¹Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.

²Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

³Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales, Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados.

* Autor para correspondencia: (F. Bautista) leptosol@ciga.unam.mx

Cómo citar este artículo:

Bautista, F., Goguitchaichvili, A., Delgado, C., Quintana, P., Aguilar, D., Cejudo, R., Cortés, J., 2021, El color como indicador de contaminación por metales pesados en suelos de la Ciudad de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 73 (1), A210920. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2021v73n1a210920>

Manuscrito recibido: 7 de Mayo de 2020
Manuscrito corregido: 17 de Septiembre de 2020
Manuscrito aceptado: 23 de Septiembre de 2020

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

El objetivo fue la evaluación del color como técnica rápida para la identificación de muestras de suelos urbanos contaminados con metales pesados en la Ciudad de México. Las concentraciones de los metales pesados se midieron por fluorescencia de rayos X, y el color se determinó con las tablas Munsell y con un colorímetro. A partir de los valores Hue, Value y Croma se formaron cinco grupos de suelo por color: I, Café rojizo oscuro, 5YR 4/2; II, Gris oscuro, 7.5YR 4/1; III, Gris olivo, 5Y 5/2; IV, Gris, 5YR 5/1; V, Gris rosáceo, 7.5YR 6/2. Con los valores colorimétricos en el sistema Rojo, Verde y Azul (RGB) se calcularon tres índices de color: Índice Hue, Índice de Rojez e Índice de saturación. La validación de los grupos de suelo formados con las tablas Munsell fue mayor con los índices de color que con los metales pesados. Los grupos de muestras de suelo urbano I y II de colores oscuros tuvieron las concentraciones mayores del Cr, Cu, Pb, Zn; también tuvieron los más altos porcentajes de Fe₂O₃, MnO, y TiO₂. Por el contrario, los grupos IV y V con colores claros tuvieron los porcentajes mayores de Al₂O₃, MgO y SiO₂. El grupo III tuvo valores intermedios de Cr, Cu, Pb, Zn, Fe₂O₃, MnO, y TiO₂. Por primera vez se reporta que el color del suelo urbano de la Ciudad de México puede ser utilizado como técnica de análisis rápido para la identificación de sitios contaminados con metales pesados.

Palabras clave: color Munsell, sistema RGB, índices de color, técnicas proxy, metales pesados.

ABSTRACT

The objective was the evaluation of color as a proxy for soil contamination by heavy metals in Mexico City. The concentrations of heavy metals were measured by X-ray fluorescence, and the color was determined with the Munsell Tables and colorimeter using Red Green Blue (RGB) system. From the Hue, Value and Croma values, five soil groups were formed by color: I, Dark reddish brown, 5YR 4/2; II, Dark gray, 7.5YR 4/1; III, Olive gray, 5Y 5/2; IV, Gray, 5YR 5/1; V, Pinkish gray, 7.5YR 6/2. With the Red Green Blue colorimetric values, three color indexes were calculated: Hue index, Redness index and saturation index. Validation of soil groups was greater with color indexes than with heavy metals. Groups I and II of dark color had the highest concentrations of Cr, Cu, Pb and Zn; they also had the highest percentages of Fe₂O₃, MnO, and TiO₂. Light colored groups IV and V had the highest percentages of Al₂O₃, MgO and SiO₂. Group III had intermediate values of Cr, Cu, Pb, Zn, Fe₂O₃, MnO, and TiO₂. For the first time, it is reported that the color of the urban soil of Mexico City can be used as a rapid analysis technique to identify sites contaminated with heavy metals.

Keywords: color Munsell, RGB system, color indexes, proxy techniques, heavy metals.

1. Introducción

En la Ciudad de México y área conurbada se liberan al ambiente partículas que contienen metales pesados y óxidos de hierro, manganeso, aluminio y silicio que son fácilmente transportadas por el viento, se depositan en diversas superficies como el suelo, y pueden ser inhaladas o ingeridas causando daños a la salud (Sabath y Robles-Osorio, 2012; WHO, 2014; Aguilera *et al.*, 2020).

Las partículas contaminantes que más dañan a la salud humana, y causan cáncer, son menores a 10 micras (PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{0.1}$). Su dispersión fuera de la Ciudad de México y área conurbada se retrasa debido a las características climáticas, geológicas, de relieve y dirección de los vientos en la cuenca (Vallejo *et al.*, 2003).

Sus fuentes son naturales, como las emisiones volcánicas, y antrópicas derivadas de las actividades de 23 millones de habitantes, 40 000 industrias y la circulación de 4 millones de vehículos (Molina *et al.*, 2010; Ramírez y Martínez, 2018).

Las estrategias de disminución de la contaminación requieren de monitoreos del contenido de metales pesados en muestras ambientales como los realizados por Vallejo *et al.* (2003) y Molina *et al.* (2010) en partículas aéreas; Cejudo *et al.* (2015), Ihl *et al.* (2015) en suelos y en plantas.

Sin embargo, el monitoreo de la contaminación por metales pesados no se realiza en ningún país del mundo. Esto sucede porque el muestreo de suelos, el tratamiento de la muestra (secado, tamizado y digestión) y los análisis químicos son costosos, consumen mucho tiempo y se generan residuos peligrosos.

Por otro lado, las investigaciones recientes han demostrado que el uso del color puede ser considerado una técnica rápida para inferir la contaminación por metales pesados en polvo urbano (Cortés *et al.*, 2015; García *et al.*, 2019; Marín *et al.*, 2019), así como también en la cantidad de materia orgánica edáfica (Dobos *et al.*, 1990; Schulze *et al.*, 1993; Bautista *et al.*, 2003; Domínguez *et al.*, 2012) y contenido de óxidos de Fe en el suelo (Curi y Franzmeier, 1984; Madeira *et al.*, 1997; Acevedo-Sandoval *et al.*, 2004; Levin *et al.*, 2005; Viscarra *et al.*, 2008; Kumaravel *et al.*, 2009).

El uso del color como técnica rápida considera que bajo cualquier combustión los óxidos de hierro y la materia orgánica se transforman en magnetita y carbón, ambos son de color negro. La magnetita va acompañada de metales pesados (Bautista *et al.*, 2014; Cortés *et al.*, 2015; García *et al.*, 2019).

El uso del color del suelo como técnica de diagnóstico rápido permitiría seleccionar las muestras de suelo más contaminadas por metales pesados que luego tendrían que pasar por las técnicas de análisis químico convencional (Espectroscopía de Absorción Atómica, ICP-Masas, Microscopía Electrónica de Barrido, entre otros).

El objetivo de este estudio fue la evaluación del color en muestras de suelo de la Ciudad de México y área conurbada como una técnica rápida en el monitoreo de la contaminación del suelo urbano por metales pesados.

2. Materiales y métodos

2.1. ZONA DE ESTUDIO, MUESTREO Y TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS

El estudio se realizó en la Ciudad de México y área conurbada (Figura 1). La altitud promedio es de 2240 msnm. Geológicamente, está ubicada sobre depósitos volcánicos en el norte, oeste, sur y sureste, y lacustres en la zona central, noreste y sureste (Díaz-Rodríguez, 2006) por lo que es una cuenca rodeada de volcanes (Vallejo *et al.*, 2003).

El diseño del muestreo de suelo fue sistemático y abarcó un área de 1 600 km² dividida en una rejilla de 10 x 10. Se recolectaron 89 muestras durante la estación seca (marzo-abril) con la finalidad de que el tiempo de pretratamiento (secado) fuera el menor.

La colecta de las muestras fue con un tubo de policloruro de vinilo de 100 cm³ que se introdujo al suelo.

2.2. ANÁLISIS QUÍMICOS

Las muestras se secaron durante dos semanas bajo la sombra y a temperatura ambiente; se molieron y se tamizaron con malla de 2 mm; la porción

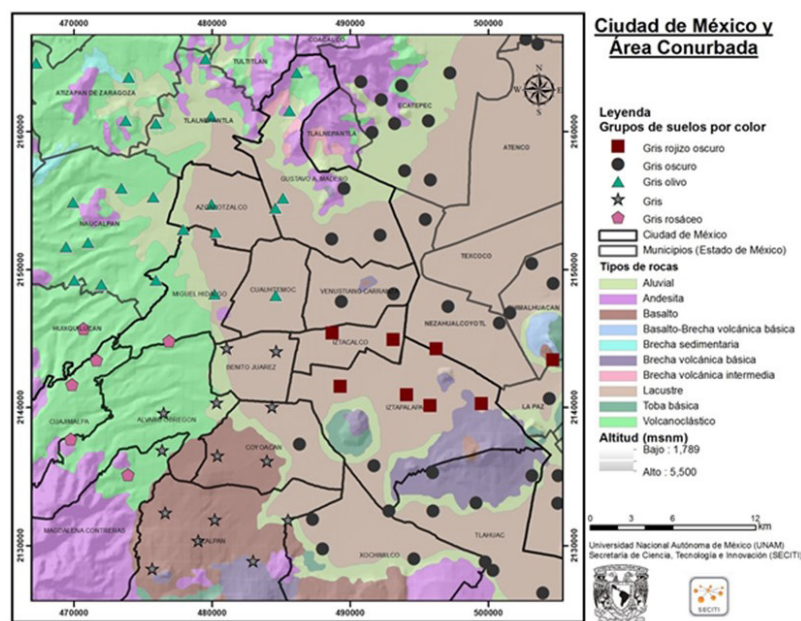


Figura 1 Localización geográfica de las muestras del suelo urbano por grupos de color en la Ciudad de México y área conurbada.

tamizada se dividió en dos partes, una de ellas se utilizó para realizar las mediciones de color y la otra para los análisis geoquímicos.

Las porciones destinadas a los análisis geoquímicos se molieron de nuevo con un mortero de ágata para aumentar la homogeneidad de la muestra (Fitton, 1997; Wei y Yang, 2010; Khodeir *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014). Las muestras de suelo se comprimieron en un dado de 1 cm de diámetro sin tratamiento químico o agentes aglutinantes y se obtuvieron pastillas que se colocaron en un porta-muestras y se sellaron con una película de poliéster (Mylar).

Las concentraciones de los metales (Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn) y de los compuestos óxidos metálicos del suelo (Na_2O , MgO , MnO , Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , CaO , TiO_2 y Fe_2O_3) y no metálicos (P_2O_5) se cuantificaron con la técnica de fluorescencia de rayos X de energía dispersa (ED-FRX) en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados de Mérida, Yucatán. La técnica es cuantitativa, rápida, no destructiva ni contaminante con un límite de detección de 1 mg/kg (Lozano y Bernal, 2005; Beckhoff *et al.*, 2006). Como control de medición se consideró el estándar con clave de identificación IGLsy-1, el cual corresponde a una sienita de nefelina con un alto contenido de Al y

Si (Lozano y Bernal, 2005; Beckhoff *et al.*, 2006; Paltridge *et al.*, 2012).

Las características y ambientes de operación del espectrómetro ED-XRF fueron las siguientes: marca Jordan Valley EX-6600, equipado con un detector Si (Li), área activa de 20 mm², resolución de 140 eV a 5.9 keV, operado a un máximo de 54 keV y 4 800 μA , en condiciones de vacío atmosférico, utilizando una tarjeta secundaria intercambiable y tiempo de medición de 300 s. Cada medición fue repetida cinco veces para obtener un promedio de concentración (Ihl *et al.*, 2015).

2.3. DETERMINACIÓN DEL COLOR

El color del suelo se determinó de manera cualitativa por comparación con las tablas Munsell (Munsell Color, 2000). La muestra seca se colocó en el porta-muestras, y en un ambiente externo y con luz del día se superpusieron a la muestra, las cartas del color hasta encontrar el matiz o tono adecuado. Los suelos se agruparon de acuerdo con el color definido por los valores Hue, Value y Chroma.

El color se determinó de manera cuantitativa con un equipo Konica Minolta modelo CR400m, los resultados, en términos del sistema de color X,

Y, Z se convirtieron al sistema R, G, B decimal mediante el programa Color Slide Rule y se calcularon los índices de color Hue (IH), Rojez (IR) y Saturación (IS) según Levin *et al.*, (2005) de la manera siguiente:

$$IH = \frac{(2 * R - G - B)}{(G - B)} \quad (1)$$

$$IR = \frac{R^2}{(B * G^3)} \quad (2)$$

$$IS = \frac{(R - B)}{(R + B)} \quad (3)$$

En donde R, G y B son los valores proporcionados por el sistema decimal RGB: R = Rojo; G = Verde; B = Azul.

2.4. ANÁLISIS DE DATOS

La influencia de los metales pesados en los índices de color se evaluó mediante un análisis de correlación simple.

Los cinco grupos de color del suelo identificados a partir de la comparación con las tablas Munsell, se validaron mediante dos análisis discriminantes: por un lado, con los valores de los contenidos de metales pesados y óxidos, y por otro, con los valores de los índices de color en donde se clasificaron mediante funciones lineales, que combinan las variables más influyentes y asignan los elementos a los grupos predefinidos, lo que permitió validar o no la formación de los grupos de suelo (Lévy *et al.*, 2003). También se midió la influencia del conjunto de los metales pesados en cada índice de color al interior de cada grupo de color de suelo a través de análisis de regresión múltiple.

En ambos análisis las variables dependientes fueron los índices de color IH, IR e IS y las variables independientes fueron las concentraciones de Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, V y los porcentajes de los óxidos Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, K₂O, CaO, TiO₂, MnO, Fe₂O₃.

La regresión lineal múltiple establece la relación de la variable dependiente Y con respecto de múltiples variables independientes X (X₁, X₂... X_n)

en un espacio multidimensional. Se determinaron los valores de las variables con mayor poder explicativo mediante los coeficientes de correlación $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$ (Vallejo, 2011).

$$Y = a + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots \beta_n X_n + e \quad (4)$$

En donde: Y = variable dependiente; a = parámetro de regresión; β_1 = incremento de Y en unidades al aumentar X; X_i = variables explicativas; e = error de la predicción.

Para comparar los contenidos de los metales pesados por los grupos de color de los suelos se utilizó el análisis de varianza no paramétrico de comparación de medianas Kruskal-Wallis (Statgraphics®, 2010). Se aplicó una prueba de rango múltiple para determinar qué grupos de suelo por color son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95.0%. Se diseñó un mapa con las diferentes zonas donde se ubicaron los cinco grupos de color del suelo y los tipos de rocas subyacentes con el programa ArcGIS 9.0 (ESRI, 2004).

3. Resultados

3.1. FORMACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS GRUPOS POR COLOR DEL SUELO

Se formaron cinco grupos por color del suelo. Los grupos I Gris rojizo oscuro y II Gris oscuro presentaron coloraciones oscuras, mientras que los suelos del grupo III Gris olivo, grupo IV Gris y el grupo V Gris rosáceo presentaron las coloraciones claras (Tabla 1, Figura 2).

La validación de los grupos por color del suelo utilizando los índices tuvo una clasificación correcta del 100 % de las muestras en todos los grupos de suelo ($p < 0.05$) (Tabla 2). La validación de los grupos por color del suelo utilizando las concentraciones de los metales pesados tuvieron un 67 % de las muestras correctamente asignadas, siendo los grupos I y II los de mayor porcentaje de correcta asignación, con 88% y 68%, respectivamente (Tabla 3). En análisis multivariados los porcentajes arriba del 50% son aceptables (Lévy *et al.*,

Tabla 1. Agrupación de las muestras de suelo por color a partir de los valores hue, value y croma identificados con las tablas Munsell.

Grupo de color	Muestras (n)	Hue	Value	Croma	Notación
I Gris rojizo oscuro	8	5YR	4	2	5YR 4/2
II Gris oscuro	38	7.5YR	4	1	7.5YR 4/1
III Gris olivo	23	5Y	5	2	5Y 5/2
IV Gris	14	5YR	5	1	5YR 5/1
V Gris rosáceo	6	7.5YR	6	2	7.5YR 6/2

Tabla 2. Validación de los grupos de color del suelo con base en los índices de color hue (IH), rojez (IR) y saturación (IS).

Color real	Muestras (n)	Color estimado a partir de los índices de color IH, IR, IS				
		I Gris rojizo oscuro	II Gris oscuro	III Gris olivo	IV Gris	V Gris rosáceo
I Gris rojizo oscuro	8	8 (100 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
II Gris oscuro	38	0 (0 %)	38 (100 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
III Gris olivo	23	0 (0 %)	0 (0 %)	23 (100 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
IV Gris	14	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	14 (100 %)	0 (0 %)
V Gris rosáceo	6	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	6 (100 %)

Tabla 3. Validación de los grupos de color del suelo con base en las concentraciones de los metales pesados.

Grupos	Muestras (n)	Color estimado a partir de las concentraciones de los metales pesados				
		I Gris rojizo oscuro	II Gris oscuro	III Gris olivo	IV Gris	V Gris rosáceo
I Gris rojizo oscuro	8	7 (88 %)	0 (0 %)	1 (12 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
II Gris oscuro	38	3 (8 %)	26 (68 %)	6 (16 %)	1 (3 %)	2 (5 %)
III Gris olivo	23	0 (0 %)	5 (22 %)	15 (65 %)	1 (4 %)	2 (9 %)
IV Gris	14	0 (0 %)	2 (14 %)	1 (7 %)	9 (64 %)	2 (14 %)
V Gris rosáceo	6	0 (0 %)	0 (0 %)	1 (17 %)	2 (33 %)	3 (50 %)

2003). La medición del color con un colorímetro es más rápida, cuantitativa y precisa, mientras que con las tablas Munsell es más tardada, cualitativa y menos precisa pero el análisis es más económico. La validación al 100% de los grupos con los índices de color indica que las mediciones colorimétricas son confiables con ambos métodos.

3.2. REGRESIONES LINEALES MÚLTIPLES ENTRE LOS ÍNDICES DE COLOR DEL SUELO Y LAS CONCENTRACIONES DE METALES PESADOS

La relación ente los metales pesados con los tres índices de color fue alta y significativa en los grupos de color I Gris rojizo oscuro, IV Gris y V Gris rosáceo ($r^2 > 0.75$, $p < 0.05$). Con el índice Hue (IH) los metales pesados mejor representados en los cinco grupos de suelos fueron el Cr, Cu y Pb, en menor proporción Ni, V, así como MnO y Fe_2O_3 (Tabla 4); con el índice de rojez (IR) fueron el Cr, Ni, Pb y Cu, en menor proporción el V, MnO y Fe_2O_3 y Zn (Tabla 5); y con el índice de saturación (IS) fueron el Cr, Cu, Ni y Pb, en menor proporción el V y Zn así como MnO y Fe_2O_3 (Tabla 6). En total los metales pesados representados en los cinco grupos de suelos con los tres índices de color tuvieron el siguiente orden: $\text{Cr}=\text{Pb}>\text{Cu}>\text{Ni}=\text{V}>\text{MnO}>\text{Fe}_2\text{O}_3>\text{Zn}$.

3.3. FORMACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS GRUPOS POR COLOR DEL SUELO

Las concentraciones mayores ($p<0.05$) de los metales Cr, Cu, Pb y Zn se encontraron en los grupos I y II de color oscuro; y las concentraciones medias en el grupo III de coloración intermedia entre color oscuro y claro (Figuras 2 y 3). Los porcentajes mayores del Fe_2O_3 , MnO, y TiO_2 se encontraron en los grupos oscuros I y II de color oscuro (Figuras 2 y 4); y los mayores porcentajes de los óxidos Al_2O_3 , MgO y SiO_2 se encontraron principalmente en los grupos III, IV y V de coloraciones claras (Figuras 2 y 4). En los grupos I y II la presencia de los metales Cr, Cu, Zn, Fe, Mn y Ti les confieren las coloraciones más oscuras, Domínguez *et al.* (2012) reporta que los metales de transición producen coloraciones oscuras.

3.4. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS MUESTRAS DE SUELO POR COLOR

Las muestras de suelo del grupo I Gris rojizo oscuro se ubican principalmente en la zona Lacustre en el centro-este de la ciudad, en las delegaciones Iztacalco e Iztapalapa y en las zonas conurbadas de Cd. Netzahualcóyotl, Chimalhuacán y La Paz (Figura 1). Este grupo en general tiene las

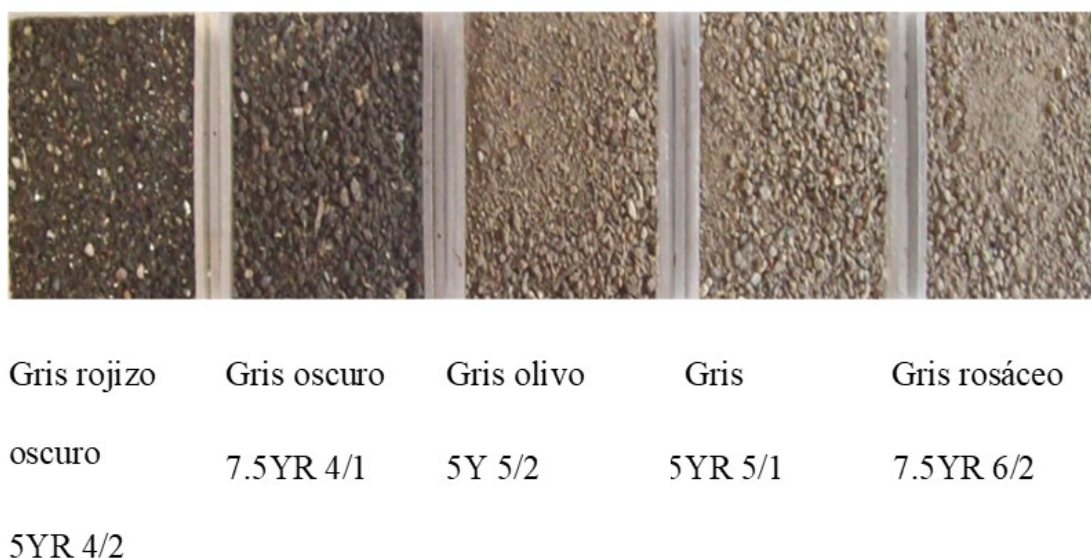


Figura 2 Coloraciones de los grupos de suelos y su nomenclatura de acuerdo con las cartas Munsell.

Tabla 4. Regresiones lineales múltiples entre el índice hue (IH) y las concentraciones de los metales pesados en los grupos de color de suelo.

Grupos	Ecuación de regresión	r ²	Valor p
I Gris rojizo oscuro	$IH = -159.06 - 0.08*Cr - 0.28*Ni + 0.19*Cu + 0.10*Zn - 0.03*Pb + 1.20*V + 294.09*MnO$	1	0
II Gris oscuro	$IH = 1.38 + 0.05*Cr - 0.02*Cu + 0.53*Fe_2O_3 + 0.003*Pb$	0.21	0.09
III Gris olivo	$IH = 11.38 - 0.01*Cr + 0.001*Cu - 31.28*MnO + 0.004*Ni - 0.004*Pb$	0.16	0.69
IV Gris	$IH = 7.8 - 0.04*Cr + 0.01*Cu - 0.59*Fe_2O_3 + 21.91*MnO - 0.004*Pb + 0.05*V$	0.83	0.04
V Gris rosáceo	$IH = 19.28 - 0.04*Cr - 0.01*Cu - 0.01*Ni - 0.002*Pb - 0.04*V$	1	0

Tabla 5. Regresiones lineales múltiples entre el índice rojez (IR) y las concentraciones de los metales pesados en los grupos de color de suelo.

Grupos	Ecuación de regresión	r ²	Valor p
I Gris rojizo oscuro	$IR = -0.05 + 0.00008*Cr - 0.0003*Ni - 0.0001*Cu + 0.0001*Zn - 0.00002*Pb + 0.0004*V + 0.06*MnO$	1	0
II Gris oscuro	$IR = 0.008 + 0.02*MnO - 0.000008*Cr - 0.000004*Cu - 0.001*Fe_2O_3 - 0.000006*Ni + 0.000003*Pb$	0.33	0.04
III Gris olivo	$IR = 0.003 - 0.000001*Cr + 0.000002*Cu + 0.000004*Ni - 0.000002*Pb$	0.08	0.4
IV Gris	$IR = -0.005 - 0.000006*Cr + 0.0004*Fe_2O_3 + 0.000002*Ni - 0.000002*Pb + 0.00006*V$	0.75	0.04
V Gris rosáceo	$IR = -0.02 + 0.0001*Cr - 0.00002*Cu + 0.00001*Ni + 0.000003*Pb + 0.00008*V$	1	0

mayores concentraciones de Cu, Pb, Zn, Fe_2O_3 , MnO y TiO_2 . Las muestras de suelo del grupo II Gris oscuro están ubicadas principalmente en la zona Lacustre en las alcaldías Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Coyoacán, Iztapalapa, Xochimilco y Tláhuac, así como en Cd. Netzahualcóyotl, Chimalhuacán, La Paz Tlalnepantla y Ecatepec (Figura 1). Este grupo en general tiene las más altas concentraciones de Cr, y concentraciones altas de Cu, Pb, Zn, Fe_2O_3 , MnO y TiO_2 . Las muestras de suelo del

grupo III Gris olivo se localizan principalmente en zonas conurbadas de Atizapán de Zaragoza, Naucalpan y en Tlalnepantla; así como en las alcaldías de Cuauhtémoc, Azcapotzalco, Gustavo A. Madero y Miguel Hidalgo (Figura 1). Este grupo en general tiene las concentraciones más altas de SiO_2 y concentraciones medias de Cr, Cu, Pb, Zn y Al_2O_3 . Las muestras de suelo de los grupos IV y V se localizan en la periferia de la ciudad, son las muestras con menores concentraciones de metales pesados.

Tabla 6. Regresiones lineales múltiples entre el índice de saturación (IS) y las concentraciones de los metales pesados en los grupos de color de suelo.

Grupos	Ecuación de regresión	r ²	Valor p
I Gris rojizo oscuro	IS= -0.42 + 0.005*Cr – 0.01*Ni – 0.007*Cu + 0.004*Zn – 0.0005*Pb + 0.003*V + 0.36*MnO	1	0
II Gris oscuro	IS = 0.29 – 0.001*Cr – 0.01*Fe ₂ O ₃ +0.0001*Pb + 0.001*V	0.34	0
III Gris olivo	IS = 0.07 – 0.0003*Zn + 0.001*Ni +0.0006*Cu + 1.28*MnO	0.34	0.09
IV Gris	IS = -0.08 + 0.0008*Cr + 0.0006*Cu +0.05*Fe ₂ O ₃ – 0.65*MnO + 0.003*Ni + 0.00005*Pb – 0.0006*Zn	0.95	0
V Gris rosáceo	IS = -0.03 + 0.001*Cr – 0.0002*Cu +0.0002*Ni + 0.0001*Pb + 0.001*V	1	0

4. Discusión

Las muestras de suelo urbano de los grupos I (gris rojizo oscuro) y II (gris oscuro), y en algunos casos el grupo III (gris olivo), alcanzaron las concentraciones mayores de Cu, Pb y Zn en este estudio, de la misma manera que lo reportado para el polvo urbano en Ensenada Baja California (Cortés *et al.*, 2015). Estos metales pesados se consideran producto de la contaminación antrópica al estar muy por arriba de los valores de fondo, como por ejemplo los 20 mg/kg de plomo, 36 mg/kg de zinc, 41 mg/kg de cromo y 7 mg/kg de cobre (Ihl *et al.*, 2015).

La presencia del Fe₂O₃ en las muestras de suelo urbano de los grupos I, II y III les proporciona las coloraciones oscuras, y se explica por la relación encontrada entre el índice de rojez y el Fe₂O₃, por lo que se infiere la presencia de maghemita o magnetita (Bautista *et al.*, 2014).

El índice de rojez del color del suelo ha sido utilizado para estimar la intensidad de meteorización del suelo y los contenidos de Fe₂O₃ (Barrón y Torrent 1986; Levin *et al.*, 2005; Viscarra Rossel *et al.*, 2008); sin embargo, al parecer en este estudio

la relación podría ser con la magnetita y/o maghemita que son producto de la combustión de combustibles fósiles y por lo tanto de carácter antrópico, por los mayores porcentajes de Fe₂O₃, TiO₂ y MnO los contenidos en partículas producto de la combustión (Abbott, 1987; Bautista *et al.*, 2014). Para estudios futuros es conveniente medir los parámetros magnéticos y si los valores de la susceptibilidad magnética y de la magnetización remanente isoterma de saturación son también altos, entonces el mineral será magnetita y/o maghemita y, por lo tanto, serán partículas antrópicas contaminantes (Aguilar-Reyes *et al.*, 2013; Bautista *et al.*, 2014; Sánchez-Duque *et al.*, 2015).

En las muestras de suelo urbano de los grupos IV y V las coloraciones claras están asociadas con la predominancia del Al₂O₃, MgO y SiO₂ y con bajas concentraciones de TiO₂, MnO y Fe₂O₃. Además, en estos grupos se presentaron los valores más bajos del índice de rojez. De la misma manera, Domínguez *et al.* (2012) reportaron la relación entre las coloraciones claras del suelo y la presencia de SiO₂ y Al₂O₃, asociados a aluminosilicatos y cuarzo, principalmente.

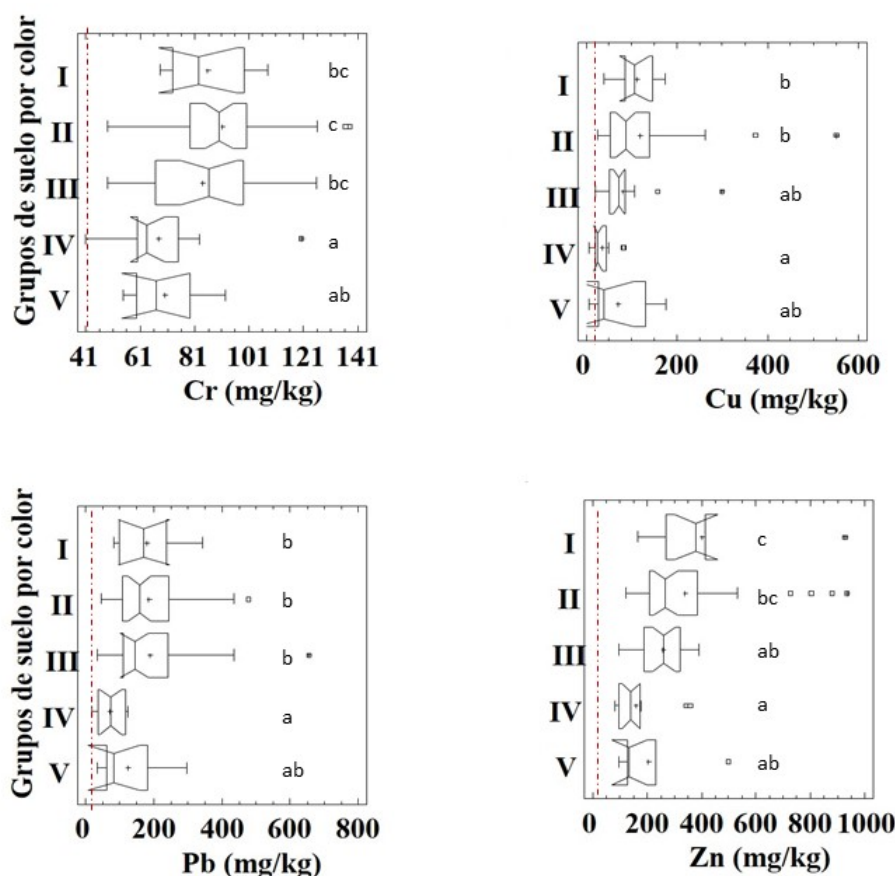


Figura 3 Concentraciones de metales pesados por grupos de color de suelos. I Gris rojizo oscuro, II Gris oscuro, III Gris olivo, IV Gris, V Gris rosáceo. Línea punteada señala el nivel de fondo. Letras diferentes significan diferencias significativas.

El uso de combustibles fósiles genera ceniza y gases. La ceniza de color negro estaría formada por partículas que contienen óxidos de hierro transformados a magnetita y maghemita (coloraciones oscuras) (Bautista *et al.*, 2014), así como metales pesados usados como antidetonantes (Mn) (Bueno-Brito *et al.*, 2005) o que son parte de las impurezas del combustible (metales pesados, principalmente Pb, Zn, Cu, V) (Ihl *et al.*, 2015). Sin embargo, la materia orgánica humificada también es de color negro o pardo oscuro, así como los óxidos de manganeso de color negro (pirolusita), ambos pudieran interferir o confundir cuando se utilice el color como indicador de contaminación por metales pesados en los suelos.

La pirolusita es el mineral de manganeso del color gris a negro que se encuentra naturalmente en las rocas que circundan a la ciudad de México, pero también el manganeso es utilizado

como antidetonante en la gasolina (1 metil-4-fenil-1,2,5,6-tetrahidropiridina) y es un componente del acero (Bueno-Brito *et al.*, 2005) y se encuentra en el polvo urbano de la Ciudad de México (Aguilera *et al.*, 2020), así que también tiene un origen antrópico.

5. Conclusiones

La principal conclusión de este trabajo fue: el color del suelo urbano puede ser utilizado como técnica de análisis rápido, de bajo costo y con la precisión suficiente para identificar muestras de suelo contaminadas con metales pesados. Es importante hacer notar que este indicador es solamente para suelos urbanos o Tecnosols.

En primera instancia, utilizando el color como técnica rápida para la identificación de meta-

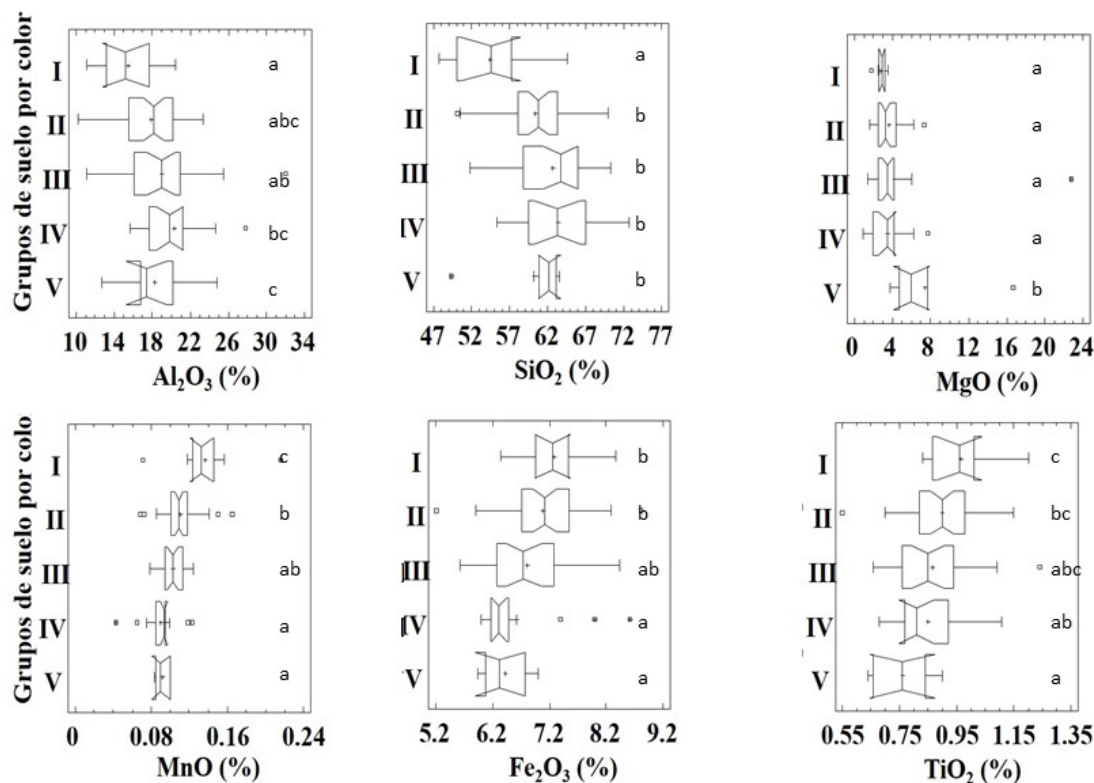


Figura 4 Concentraciones de los óxidos por grupos de color de suelos. I Gris rojizo oscuro, II Gris oscuro, III Gris olivo, IV Gris, V Gris rosáceo. Letras diferentes significan diferencias significativas.

les pesados en el suelo urbano de la Ciudad de México las clases serían: suelos contaminados gris rojizo oscuro 5YR 4/2 y gris oscuro 7.5YR 4/1, contaminación intermedia suelos grises olivo 5Y 5/2; y suelos poco contaminados los grises 5YR 5/1 y grises rosáceos 7.5YR 6/2.

Los índices de color del suelo urbano solo se validaron, mediante regresiones múltiples, para los suelos de colores gris rojizo oscuro y gris oscuro debido, probablemente, a la interferencia de componentes naturales, como los minerales de hierro y manganeso y a la materia orgánica humificada.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento al proyecto a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (PAPIIT IN 209218) y al CONACYT (283135).

Referencias

- Abbott, P.J., 1987, Methylcyclopentadienyl manganese tricarbonyl (MMT) in petrol: The toxicological issues: Science of the Total Environment, 67 (2-3), 247-55. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(87\)90215-4](https://doi.org/10.1016/0048-9697(87)90215-4).
- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., Cruz-Chávez, E., 2004, El papel de óxidos de hierro en suelos: Terra Latinoamericana, 22(4), 485-497.
- Aguilar-Reyes, B., Mejía, V., Goguichaishvili, A., Escobar, J., Bayona, G., Bautista, F., Morales Contreras, J., Ihl, T., 2013, Reconnaissance environmental magnetic study of urban soils, dust and leaves from Bogotá, Colombia: Studia Geophysica et Geodaetica, 57 (4), 741-754. <https://doi.org/10.1007/s11200-012-0682-9>.
- Aguilera A, Bautista F, Gogichaichvili A, Gutiérrez-Ruiz ME, Ceniceros-Gómez

- AE, López-Santiago NR., 2020, Spatial distribution of manganese concentration and load in street dust in Mexico City: *Salud Publica México*, 62(2), 147-155. <https://doi.org/10.21149/10577>.
- Barrón, V., Torrent, J., 1986, Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil colour: *European Journal of Soil Science*, 37, 499-510. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1986.tb00382.x>
- Bautista-Zúñiga, F., Jiménez-Osornio, J., Navarro-Alberto, J., Manu, A., Lozano, R., 2003, Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos: *Terra*, 21, 1-11.
- Bautista, F., Cejudo, R., Aguilar, B., Goguichaishvili, A., 2014, El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: una revisión: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66 (2), 123-134. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2014v66n2a11>
- Beckhoff, B., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R., Wolff, H., 2006, *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*: Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, Alemania, 878 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-36722-2>
- Bueno-Brito, C., Sánchez-Ramos, A., Armenta-Solís, A., González-Vera, E., 2005, Contenido de plomo y manganeso en despachadores de gasolina: *Bioquímica*, 30(2), 41-46.
- Cejudo-Ruiz, R., Bautista, F., Quintana, P., Delgado-Carranza, M.C., Aguilar, D., Goguichaishvili, A., Morales-Contreras, J.J., 2015, Correlación entre elementos potencialmente tóxicos y propiedades magnéticas en suelos de la Ciudad de México para la identificación de sitios contaminados: definición de umbrales magnéticos: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32 (1), 50-61.
- Cortés, J.L., Bautista, F., Quintana, P., Aguilar, D., Goguichaishvili, A., 2015, The color of urban dust as an indicator of contamination by potentially toxic elements: the case of Ensenada, Baja California, Mexico: *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21 (3), 255-266. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.02.003>
- Curi, N., Franzmeier, D.P., 1984, Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil: *Soil Science Society of American Journal*, 48 (2), 341-346. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800020024x>
- Chen, H., Lu, X., Li, L.Y., Gao, T., Chang Y., 2014, Metal contamination in campus dust of Xi'an, China: A study based on multivariate statistics and spatial distribution: *Science of the Total Environment*, 484, 27- 35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.026>
- Díaz-Rodríguez, J., 2006, Los suelos lacustres de la ciudad de México: *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 62 (2), 111-129.
- Dobos, R.R., Ciolkosz, E.J., Waltman, W.J., 1990, The effect of organic carbon, temperature, time, and redox conditions on soil color: *Soil Science and Interdisciplinary Approach to Soils research*, 150 (2), 506-512. <https://doi.org/10.1097/00010694-199008000-00003>
- Domínguez Soto, J.M., Román Gutiérrez, A.D., Prieto García, F., Acevedo Sandoval, O., 2012, Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos: *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3 (1), 141-155.
- Environmental Systems Research Institute Inc (ESRI), 2004, *Getting started with ArcGIS 9*: Redlands, CA, EUA, Environmental Systems Research Institute Inc.
- Fitton, G., 1997, X-ray fluorescence spectrometry, en, Gill, R. (ed.), *Modern analytical geochemistry: An introduction to quantitative chemical analysis for earth environmental and materials scientists*: Gran Bretaña, Royal Harlow, 87-115.
- García, R., Delgado, C., Cejudo, R., Aguilera, A., Goguichaishvili, A., Bautista F., 2019, El color del polvo urbano como indicador de contaminación por metales pesados: *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26 (1), 3-15. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.01.002>

- Ihl, T., Bautista, F., Cejudo, R., Delgado, C., Quintana, P., Aguilar, D., Goguitchaichvili, A., 2015, Concentration of toxic elements in topsoils of the metropolitan area of Mexico City: a spatial analysis using Ordinary kriging and Indicator kriging: *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31 (1), 47-62.
- Khodeir, M., Shamy, M., Alghamdi, M., Zhong, M., Sun, H., Costa, M., Chen, L., Maciejczyk, P., 2012, Source apportionment and elemental composition of PM_{2.5} and PM₁₀ in Jeddah City, Saudi Arabia: *Atmospheric Pollution Research* 3 (3), 331-340. <https://doi.org/10.5094/apr.2012.037>
- Kumaravel, V., Sangode, S.J., Siva Siddaiah, N., Kumar R., 2009, Interrelation of magnetic susceptibility, soil color and elemental mobility in the Pliocene–Pleistocene Siwalik paleosol sequences of the NW Himalaya, India: *Geoderma*, 154 (2010), 267-280. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.013>
- Levin, N., Ben-Dor, E., Singer, A., 2005, A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments: *International Journal of Remote Sensing*, 26 (24), 5475-5492. <https://doi.org/10.1080/01431160500099444>
- Lévy, J., Varela, J., Calvo, A., Rodríguez, M., 2003, Análisis discriminante múltiple, en Lévy, J.P., Varela, J. (coord) *Análisis Multivariable para las Ciencias Sociales*: Madrid, España, Pearson Prentice Hall, 251-276.
- Lozano, R., Bernal, J.P., 2005, Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22 (3), 329-344.
- Madeira, J., Bedidi, A., Cervelle, B., Pouget, M., Flay, N., 1997, Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: the application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia, Brazil: *International Journal of Remote Sensing*, 18 (13), 2835-2852. <https://doi.org/10.1080/014311697217369>
- Marín, P., Sánchez, A., Díaz-Pereira, E., Bautista, F., Romero, M., Delgado, M.J., 2018, Assessment of Heavy Metals and Color as Indicators of Contamination in Street Dust of a City in SE Spain: Influence of Traffic Intensity and Sampling Location: *Sustainability*, 10, 4105; <https://doi.org/10.3390/su10114105>
- Molina, L.T., Madronich, S., Gaffney, J.S., Apel, E., de Foy, B., Fast, J., Ferrare, R., Herndon, S., Jiménez, J.L., Lamb, B., Osornio-Vargas, A.R., Russell, P., Schauer, J.J., Stevens, P.S., Volkamer, R., Zavala, M., 2010, An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 8697-8760. <https://doi.org/10.5194/acp-10-8697-2010>
- Munsell color, 2000, Munsell® Soil Color Charts: New Windsor, Nueva York. EUA, GretagMacbeth. <https://www.worldcat.org/title/munsell-soil-color-charts/oclc/869844188?referer=di&ht=edition>
- Paltridge, N.G., Palmer, L.J., Milham, P.J., Guild, G.E., Stangoulis, J.C.R., 2012, Energy-dispersive X-ray fluorescence analysis of zinc and iron concentration in rice and pearl millet grain: *Plant Soil*, 361 (1-2), 251-260. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1104-4>
- Ramírez Velázquez, B.R., Martínez Reséndiz, J., 2018, La dimensión regional de la movilidad y su impacto en la contingencia ambiental de la Ciudad de México, en Fernández Silva, P. Y., Suárez Lastra, M., Quiroz Rothe, H. (coords), *La movilidad en la Ciudad de México. Impactos, conflictos y oportunidades*: CDMX, UNAM, 40-55. <http://dx.doi.org/10.14350/sc.07>
- Sabath, E., Robles-Orsorio, M.L., 2012, Medio ambiente y riñón: nefrotoxicidad por metales pesados: *Nefrología*, 32 (3), 279-286. <https://doi.org/10.3265/Nefrologia.pre2012.Jan.10928>
- Sánchez-Duque, A., Bautista, F., Goguichaishvili, A., Cejudo-Ruiz, R., Reyes-López, J.A.,

- Solís-Domínguez, F.A., Morales-Contreras, J.J., 2015, Evaluación de la contaminación ambiental a partir del aumento magnético en polvos urbanos. Caso de estudio en la ciudad de Mexicali, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32 (3), 501-513.
- Schulze, D.G., Nagel, J.L., Van Scoyoc, G.E., Henderson, T.L., Baumgardner, M.F., Stott, D.E., 1993, The significance of organic matter in determining soil colors, en *Soil color*, Bigham, M., Ciolkosz, E.J. (ed), Soil Science Society of America, Madison: Wisconsin, EUA, Special Publ, 71-90.
- Statgraphics®, 2010, Centurion XVI User Manual. Estados Unidos de América, StatPoint Technologies, Inc., 297 p.
- Vallejo, M., Jáuregui-Renaud, K., Hermosillo, A.G., Márquez, M.F., Cárdenas, M., 2003, Efectos de la contaminación atmosférica en la salud y su importancia en la Ciudad de México: *Gaceta Médica de México*, 139 (1), 57-63.
- Vallejo, P.M., 2011, *Correlación y regresión simple y múltiple*: Madrid, España, Universidad Pontificia Comillas, 24 p.
- Viscarra Rossel, R.A., Fouad, Y., Walter, C., 2008, Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents: *Biosystems Engineering*, 100, 149-159. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.02.007>
- Wei, B., Yang, L., 2010, A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China: *Microchemical Journal*, 94 (2), 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.09.014>
- World Health Organization (WHO), 2014, 7 million premature deaths annually linked to air pollution, (en línea) <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/12/04/2018>