

El magnetismo y el color como indicadores de cambios en el suelo por quema agrícola

Magnetism and color as indicators of changes in soil by stubble burning

Lizeth **Iniesta-Martínez**¹, Rafael **García-Ruiz**², Rufo **Sánchez**³, Avto **Goguitchaichvili**², Francisco **Bautista**^{1,*}

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

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

³ División Académica de Ciencias Agropecuarias, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco, México.

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

Cómo citar este artículo:

Iniesta-Martínez, L., García-Ruiz, R., Sánchez, R., Goguitchaichvili, A., Bautista, F., 2023, El magnetismo y el color como indicadores de cambios en el suelo por quema agrícola: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 75 (2), A280323. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2023v75n2a280323>

Manuscrito recibido: 17 de Mayo de 2022.
Manuscrito corregido: 4 de Febrero de 2023.
Manuscrito aceptado: 27 de Marzo de 2023.

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

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CCBY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

La quema agrícola es una práctica común en las plantaciones de caña de azúcar en México, se le atribuyen efectos positivos y negativos sobre el suelo. Sin embargo, no existe un consenso sobre los cambios que provoca la quema del suelo, por lo que es necesario estudiar este fenómeno a través de indicadores de bajo costo y rápido análisis. Las técnicas magnéticas y de color pueden ser métodos indirectos, rápidos y económicos que pueden ayudar a comprender los cambios químicos que la quema agrícola provoca en los suelos. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el color y la susceptibilidad magnética como indicadores de cambio en el suelo por efecto de la quema agrícola. El estudio se realizó en un Vertisol cultivado con caña de azúcar en Tabasco, México. Se tomaron muestras de suelo en diez sitios dentro de la parcela, en cada sitio se colectaron muestras cada dos centímetros hasta 20 cm de profundidad del suelo, antes y después de la quema agrícola. En total se analizaron 200 muestras de suelo. Durante las quemas, se registraron las temperaturas del suelo a 0, 2 y 5 cm de profundidad. Los parámetros e índices de color se analizaron con el sistema CIE-L*a*b*, y la susceptibilidad magnética de alta y baja frecuencia se midieron con un equipo Bartington MS2. Después de la quema agrícola, los suelos mostraron un aumento de los tonos oscuros a cuatro centímetros de profundidad. Los parámetros magnéticos también mostraron cambios en el suelo para los 4 cm de profundidad después de la quema agrícola. Los resultados muestran que el color y la susceptibilidad magnética son propiedades del suelo eficientes para identificar las modificaciones del suelo causadas por la quema agrícola. En este estudio de caso, el efecto de la quema agrícola en los cultivos de caña de azúcar fue de corto plazo y superficial en el Vertisol.

Palabras clave: Susceptibilidad Magnética, CIE-L*a*b*, RGB, Índice de enrojecimiento, Vertisol.

ABSTRACT

*Agricultural burning is a common practice in sugarcane plantations in Mexico that exerts positive and negative effects on the soil. However, there is no consensus on the soil changes caused by the burning, thus highlighting the need to study this phenomenon through low-cost and quick-to-analyze indicators. Magnetic and color techniques can be indirect, fast, and cheap methods that can help to understand the chemical changes that agricultural burning causes to soils. We aim to evaluate the color and magnetic susceptibility of the soil as indicators of changes caused by agricultural burning. The study was carried out on a Vertisol grown with sugarcane in Tabasco, Mexico. Soil samples were taken at ten sites within the plot, at each site soil samples were collected every two centimeters up to 20 cm of soil depth, before and after agricultural burning. In total, 200 soil samples were analyzed. Temperatures were recorded during agricultural burning at 0, 2, and 5 cm depths. The parameters and color indices were analyzed in the CIE-L*a*b* system in the soil samples, and the high and low-frequency magnetic susceptibility were measured with Bartington MS2 equipment. After agricultural burning, the soils showed increased dark tones at four centimeters depth. Also, magnetic parameters showed changes in soil for the 4 cm in depth after the agricultural burning. The results show that color and magnetic susceptibility are efficient soil properties for identifying soil modifications caused by agricultural burning. In this case study, the effect of agricultural burning on sugarcane crops was short-term and shallow in the soil.*

Keywords: Magnetic Susceptibility, CIE-L*a*b*, RGB, Redness Index, Vertisol.

1. Introducción

La quema agrícola ha sido cuestionada severamente en los últimos años, debido a que se libera CO₂ a la atmósfera, lo que provoca un aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero, así como por las repercusiones negativas a la salud humana, en particular, por el aumento de enfermedades respiratorias (Cançado *et al.*, 2006); y se aduce una drástica afectación al suelo (Heydari *et al.*, 2016; Sommers *et al.*, 2014). Entre los aspectos positivos de la quema agrícola, se encuentra la disminución de las plagas y malezas (Dinardo-Miranda y Vilela-Franco, 2013); la disminución de los residuos vegetales; y el mejoramiento de la fertilidad del suelo (Cabrera y Zuaznábábar, 2010, AfifKhouri y Oliveira-Prendes, 2006). En México, el uso de la quema agrícola está ampliamente difundido, por lo que se han instrumentado políticas regulatorias para el uso adecuado del fuego que, entre otras acciones, promueven las quemadas controladas para reducir al mínimo los efectos dañinos, y potenciar los efectos benéficos (SEMARNAT/SAGARPA, 1999).

En México se cultivan 834,955 hectáreas de caña de azúcar, distribuidas en 22 entidades del país (SIAP, 2022). En esta superficie, el uso del fuego en la agricultura constituye un agente de cambio ambiental, con impactos tanto locales como globales, y que ejerce una fuerte influencia en los procesos de los ecosistemas (Roy *et al.* 2010). Sin embargo, los efectos de las quemadas en los suelos no se pueden generalizar, debido a que cada suelo conduce el calor de manera diferente, las quemadas varían tanto en duración, como en intensidad, la conjunción de ambos factores constituye la severidad de la cual depende la profundidad que se afecta y los cambios edáficos que se producen durante la quema (Lázaro-Sánchez *et al.* 2021). Por lo tanto, cada suelo y cada tipo de quema requieren ser analizados, para valorar objetivamente los impactos ambientales que se producen. Estudios realizados por González *et al.* (2001) y García (2004) indican que, la quema agrícola genera modificaciones a las propiedades químicas y biológicas del suelo, en función de la

intensidad, tiempo de residencia, frecuencia del fuego, así como la profundidad del perfil que se afecta durante la combustión.

Un efecto que el fuego provoca en el suelo, es la generación de condiciones oxidantes, que inducen la transformación de minerales de hierro (II) a minerales de hierro (III) (Bautista *et al.*, 2014), los cuales están presentes en la mayoría de los suelos, y cuya importancia es que influyen en el color, agregación, capacidad de intercambio de cationes, retención de fósforo, conductividad eléctrica y la nutrición vegetal (Schwertmann, 1993; Acevedo-Sandoval *et al.*, 2002; Bautista *et al.*, 2014). Estas transformaciones minerales que se producen debido a la quema, podrían ser advertidas mediante la susceptibilidad magnética, una técnica que registra la magnetización adquirida por unidad de campo, que indica la facilidad con la que un material se puede magnetizar bajo la presencia de un campo externo (Thomson y Oldfield, 1986; Liu *et al.*, 2012). El uso de esta técnica ha sido importante para determinar las concentraciones de minerales magnéticos, por lo que comúnmente es utilizada para realizar estudios de magnetismo ambiental y paleoclima (Aguilar *et al.*, 2013).

La composición mineralógica es un factor primario que define el color del suelo (Velázquez *et al.*, 2007), por tanto, el color funge como un indicador de las condiciones en las que se encuentra (Harden., 1982). Gracias a esto, se han diseñado equipos para la medición del color mediante reflectancia y transmisión de la luz en muestras sólidas, y sistemas ópticos de color como CIE - L * a * b*, CIE - RGB, y Munsell (García *et al.*, 2019; Vodyanitskii y Savichev., 2017), que proporcionan parámetros cuantitativos útiles para el cálculo de los índices de color (matiz, enrojecimiento, saturación) relacionados con las propiedades intrínsecas del suelo, como la materia orgánica y los óxidos de hierro (Kirillova *et al.*, 2015; Vodyanitskii y Savichev, 2017). El sistema CIE - L * a * b* se reconoce como uno de los espacios de color con mayor uniformidad y versatilidad (Velázquez *et al.*, 2007), siendo un método cada vez más utilizado en diversos campos de investigación (Barret., 2002; Velázquez *et*

al., 2007). La aplicación de la técnica del color mediante los sistemas $CIE - L * a * b^*$ en el suelo, permite observar la composición mineralógica y, por ende, detectar características particulares de los suelos, como es el caso de los minerales de hierro (Domínguez *et al.*, 2012).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el color y la susceptibilidad magnética, como indicadores de cambios en el suelo por el efecto de la quema agrícola.

2. Materiales y métodos

2.1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El muestreo se realizó dentro del poblado C-11, en el municipio de Cárdenas, Tabasco, México (17° 59' N; 93° 33' O), el cual tiene una precipitación promedio de 2163 mm, con una temperatura media anual de 26.5° C, un clima cálido húmedo tropical (Amw) (García., 2004) y de acuerdo con la WRB del 2015 el suelo se clasificó como Vertisol (Figura 1).

Se seleccionaron aleatoriamente diez sitios de muestreo en una parcela de diez hectáreas. En cada sitio se tomaron muestras de suelo cada 2 cm hasta un máximo de 20 cm de profundidad, antes y después de la quema obteniendo dos series de muestras, 100 antes y 100 después de la quema, siendo un total de 200 muestras, a dichas muestras se les aplicó un tratamiento de secado a la sombra y tamizado a 2 mm.

2.2. MODELACIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL SUELO DURANTE LA QUEMA AGRÍCOLA

La temperatura que provoca la quema en la parte subterránea de la parcela se monitoreó en 10 sitios. Se colocaron cuatro piezas de cerámica cubiertas con un indicador Tempilaq® a 0, 2 y 5 cm de profundidad. Cada pieza era termosensible a 149, 191, 260 y 302 °C, respectivamente. En la parte aérea se midió la temperatura del suelo en diez sitios de la misma parcela, a los 20, 40 y 60 segundos respectivamente. Se utilizó un termómetro infrarrojo de la marca AMPROBE® modelo IR-750.

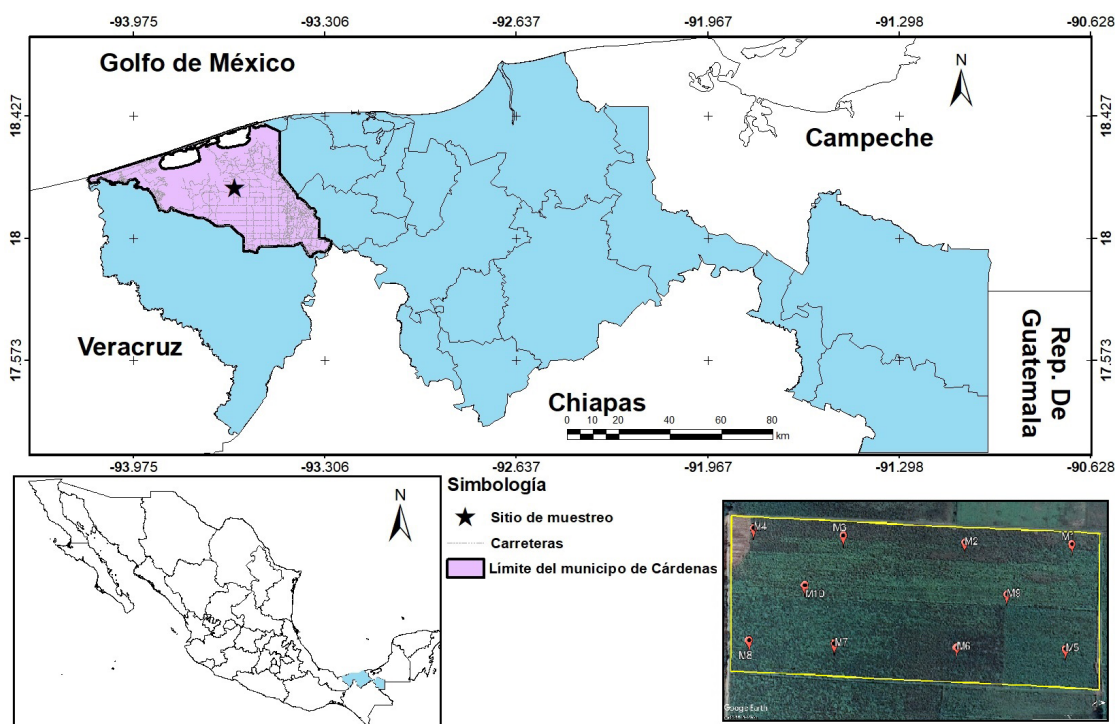


Figura 1 Localización de la zona de estudio

Con los datos obtenidos a partir de las piezas de cerámica y del termómetro de infrarrojo se realizó una modelación de la temperatura haciendo uso de la ecuación de calor en una dimensión, determinando el paso de la temperatura a través suelo en estado estacionario para conocer el calentamiento del suelo con respecto a la profundidad. Posteriormente se hizo una modelación con una matriz de diferenciación (González-Campos y García-Ruiz, 2013), mediante una integración numérica en el tiempo de manera iterativa. En estado estacionario se toman como referentes los valores de temperatura de las cerámicas en sus valores máximos y mínimos, mientras que el comportamiento dinámico se toma en cuenta el tiempo y la constante de proporcionalidad o difusión térmica aproximada (*c*) para el suelo en cuestión, tomando en cuenta su densidad 1.25 g/cm³ y el tipo de suelo, para tener una constante de difusión aproximada y ver el impacto de la quema con respecto al tiempo por conductividad.

$$\frac{dT}{dt} = c \frac{d^2T}{dz^2} \tag{Ec1}$$

Donde: T= variación de la temperatura; t= variación en el tiempo; d²T/dz²= diferencial de segundo orden con respecto a la profundidad.

2.3. EL COLOR DEL SUELO Y LAS PROPIEDADES MAGNÉTICAS

Se obtuvieron los parámetros de color *L * a * b** del sistema CIE, de cada una de las muestras de suelo, con un colorímetro Konica Minolta Cr-5 a un iluminante D65 simulando la luz al medio día y un observador de 2°, obteniendo un indicador del color absoluto de las muestras sólidas en términos de los atributos valorados siguiendo la teoría de tri-estímulos del ojo humano para distinguir los colores (Sánchez-Marañón *et al.*, 1995). Con los parámetros de sistema CIE - *L * a * b** se calcularon los índices de rojez (IR_{L*a*b*}) e índice de rojez relativo (IRR_{L*a*b*}) relacionados con los

óxidos de hierro presentes en el suelo como la hematita (Vodyanitskii y Savichev, 2017).

$$IR_{Lab} = \frac{a(a^2+b^2)^{0.5} 10^{10}}{bL^6} \tag{Ec2}$$

$$IRR_{Lab} = \frac{a}{b} \tag{Ec3}$$

Donde: *L** es el parámetro de luminosidad; *a** es la coordenada de verde a rojo y *b** es la coordenada de azul a amarillo (Kirillova *et al.*, 2015).

Posteriormente las muestras se colocaron en cubos de plástico de 8 cm³ libres de información magnética, para determinar su susceptibilidad magnética volumétrica a baja frecuencia (*X_{lf}*) y alta frecuencia (*X_{hf}*) dentro del Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental (LUGA) UNAM, para lo cual se utilizó un equipo Bartington MS2 con un sensor MS2B, en un campo magnético de ~80 A/m a dos frecuencias: baja (0.465 kHz) y alta (4.65 kHz), siguiendo la ecuación:

$$X = \frac{K}{\rho} \tag{Ec4}$$

Donde ρ (rho) es la densidad del material en kg/m³ (Maher, 1986).

Con los valores de *X_{lf}* y *X_{hf}* se calculó el porcentaje de la susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia (*X_{df}* %) para poder detectar y cuantificar la presencia de minerales ferrimagnéticos (SP) ultra finos (<0.03 μm), derivados de procesos bioquímicos en el suelo (Sandgren y Snowball, 2001; Evans y Heller, 2003), determinados por (Kapper *et al.*, 2020; Maher, 1986).

$$X_{df} \% = \frac{X_{lf} - X_{hf}}{X_{lf}} \cdot 100 \tag{Ec5}$$

Los valores de *X_{df}* % indican que no hay concentraciones de granos SP; valores entre indican la existencia de una mezcla de granos SP con granos más gruesos; valores de *a* muestran que todos los granos son SP y la existencia de valores de 14 son indicadores de errores en la medición (Dearing, 1999; Maher, 1986).

2.4. ANÁLISIS DE DATOS

Se representaron de manera gráfica los parámetros de color, índices de color y variables magnéticas por profundidad en un diagrama de caja y bigotes. Se corroboró la distribución normal de los datos. La prueba de varianza de dos vías (ANOVA) se utilizó para identificar las diferencias entre las medias por la exposición a la quema y su profundidad. Se realizó un análisis de Fisher al conjunto de datos obtenidos para encontrar la profundidad donde se establecieron las diferencias con mayor impacto debido a la quema. Se realizó un análisis de correlación entre los índices, parámetros de color y las propiedades magnéticas. Las correlaciones entre las variables se realizaron por pares tomando en cuenta la profundidad de las muestras y comparando los promedios de cada variable a su profundidad correspondiente. Todos los análisis estadísticos y las gráficas se realizaron en R (R Core Team, 2020).

3. Resultados

3.1. LA INTENSIDAD DE LA QUEMA AGRÍCOLA

Las temperaturas que se alcanzan en la superficie del suelo a los 20 segundos fueron de 372 ± 86 °C; a los 40 segundos de 500 ± 65 °C y a los 60 segundos de 549 ± 48 °C. Los indicadores Tempilaq® en conjunto con las piezas cerámicas registraron una temperatura máxima de 550°C al ras del suelo, pero su temperatura disminuyó rápidamente con respecto a las profundidades iniciales ya que en a los 2 cm de profundidad se obtuvieron temperaturas inferiores a los 149°C.

Mediante una modelación sencilla de la temperatura haciendo uso de la ecuación de calor en una dimensión, se determinó el paso de la temperatura en el suelo en estado estacionario y con respecto al tiempo. Tomando como condiciones iniciales las temperaturas registradas en la superficie de 550°C y a los 2 cm <149 °C, tomando en cuenta que por debajo de los 2 cm la temperatura decae a su fase más baja. Al modelar la temperatura mediante la ecuación de calor en

estado estacionario se observó que la temperatura decae rápidamente en los primeros 2 cm a diferencia del modelo dinámico que indica que su temperatura decae a los 5 cm de profundidad lo cual va de la mano con los cambios en el color de las muestras encontrados en los primeros 4 cm (Figura 2).

Al iniciar la quema en la parcela, cada sitio de muestreo se expone al fuego durante aproximadamente un minuto dependiendo la velocidad del viento y el material combustible acumulado. Mientras el fuego avanza por toda la superficie, en total la quema de una parcela de 10 hectáreas termina a los 20 min.

3.2. LOS CAMBIOS EN EL COLOR DEL SUELO

Considerando la profundidad antes y después de la quema (Tabla 1, Figura 3) se observaron diferencias estadísticamente significativas en los primeros cuatro centímetros para los parámetros de color, con una disminución en la luminosidad del suelo (L^*) tornándose más oscuro, un aumento en su cromaticidad (a^*) tendiendo más hacia el rojo y un incremento en el parámetro b^* tendiendo el color hacia el amarillo. También los índices $IR_{L^*a^*b^*}$ e $IRR_{L^*a^*b^*}$ tuvieron los valores mayores en los primeros cuatro centímetros de profundidad (Figura 4). Solo en el $IRR_{L^*a^*b^*}$ permitió identificar cambios en el suelo a otras profundidades, pero no por el efecto de la quema agrícola (Figura 4).

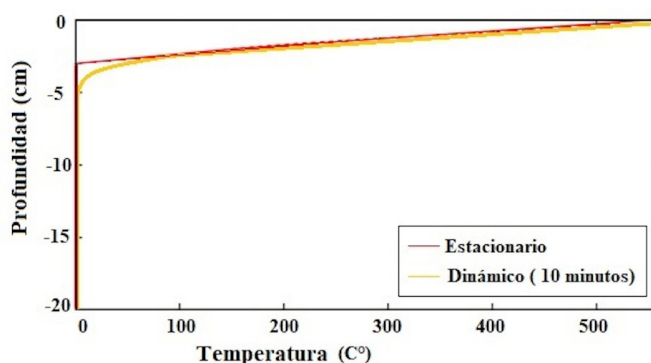


Figura 2 Transferencia de la temperatura en los suelos agrícolas estudiados con respecto a la modelación estacionaria y dinámica.

Parámetros en índices de color mostraron ser buenos indicadores rápidos y de bajo costo del efecto de la quema agrícola en suelos del grupo Vertisol.

3.3. LOS CAMBIOS EN LOS PARÁMETROS MAGNÉTICOS DEL SUELO

Los parámetros magnéticos presentaron diferencias significativas considerando los factores quema agrícola, profundidad y la interacción quema-profundidad (Tabla 1).

Se observó un aumento de los parámetros magnéticos en los primeros cuatro centímetros de profundidad (Figura 5), debido probablemente a una mayor concentración de minerales magnéticos y partículas superparamagnéticas por el proceso de la quema agrícola, siendo la X_{df} % el parámetro magnético más sensible a la quema agrícola. Esta situación confirma que la quema agrícola propicia la transformación de los óxidos de hierro a magnetita en partículas ultrafinas. El estudio de la interacción de los factores quema y profundidad permitió identificar que la susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia fue el único parámetro sensible

a detectar pequeños cambios a los 6 cm de profundidad (Figura 6).

La correlación lineal de Pearson en los suelos quemados por profundidad promediada por pares dio como resultados correlaciones que van de moderadas a altas entre los parámetros de color, índices de color y los parámetros magnéticos (Tabla 2), donde se distingue que el índice de tiene una correlación alta con los parámetros magnéticos, seguido de la luminosidad, por lo que ambos parámetros (L y X_{df} %) son los mejores indicadores del proceso estudiado.

4. Discusión

El color y las propiedades magnéticas del suelo son sumamente sensibles a los cambios mineralógicos por la quema agrícola en el caso del Vertisol en estudio, incluso cuando la quema es de baja intensidad y de baja duración como en este experimento. Además, son técnicas rápidas y de bajo costo, no destructivas y no generadoras de residuos químicos peligrosos, lo cual permite su utilización como indicadores.

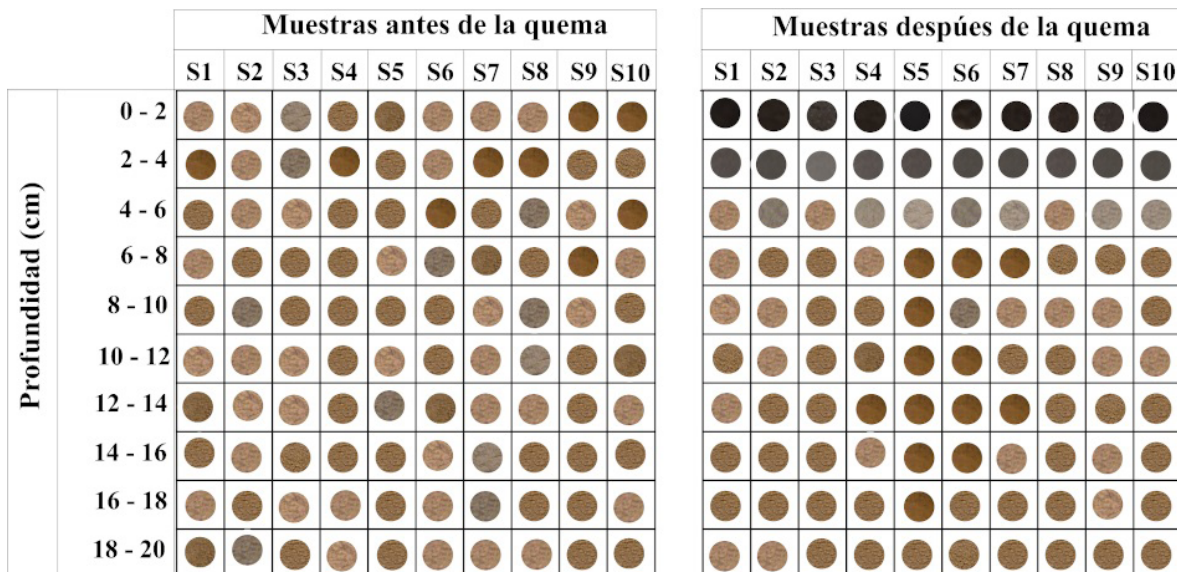


Figura 3 Fotografías del color de las muestras antes y después de la quema, con respecto a su profundidad y el perfil muestreado.

Tabla 1. Análisis ANOVA de dos vías con respecto a las muestras de suelo antes y después de la quema.

Parámetros e índices	Efecto de la Profundidad	Efecto de la quema	Efecto de la quema y la profundidad
L*	0.079	0.030	0.006
a*	0.058	0.022	0.031
b*	0.996	0	0.050
IR	0.788	0.009	0.004
IRR	0.001	0.01	0.012
χ_{hf}	8.20E-13	2.10E-08	0.036
χ_{hf}	3.2E-08	2.60E-05	0.025
χ_{df} (%)	1.60E-05	0.043	0.022

Parámetros e índices de color (L^* , a^* , b^* , $IR_{L^*a^*b^*}$, $IRR_{L^*a^*b^*}$, parámetros magnéticos (χ_{hf} , χ_{df} , χ_{If}). Diferencia significativa $p < = 0.05$

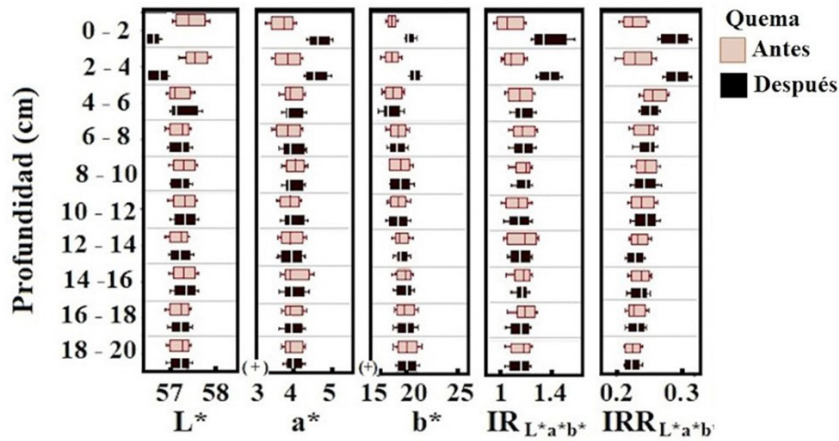


Figura 4 Parámetros e índices de color del suelo con respecto a su profundidad antes y después de la quema agrícola.

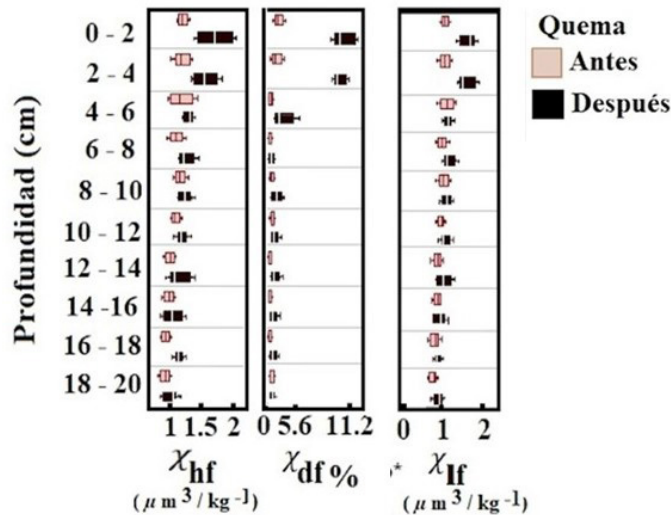


Figura 5 Parámetros magnéticos con respecto a su profundidad antes y después de la quema agrícola.

Tabla 2. Correlación lineal de Pearson entre los promedios por profundidad de los parámetros de color, índices de color y parámetros magnéticos.

Parámetros	L*	a*	b*	IR	IRR	χ_f	χ_{hf}	$\chi_{df}^{\circ}/\%$
L*	1.00	1.00	-0.07	0.68	0.87	0.82	0.64	0.97
a*	1.00	1.00	-0.05	0.73	0.86	0.80	0.61	0.97
b*	-0.07	-0.05	1.00	-0.09	-0.55	-0.53	-0.72	-0.19
IR	0.68	0.73	-0.09	1.00	0.66	0.48	0.32	0.68
IRR	0.87	0.86	-0.55	0.66	1.00	0.94	0.87	0.90
χ_f	0.82	0.80	-0.53	0.48	0.94	1.00	0.96	0.90
χ_{hf}	0.64	0.61	-0.72	0.32	0.87	0.96	1.00	0.73
$\chi_{df}^{\circ}/\%$	0.97	0.97	-0.19	0.68	0.90	0.90	0.73	1.00

L*= parámetro de luminosidad; a*= coordenada de verde a rojo; b*= coordenada de azul a amarillo; IR= índice de rojez; IRR= índice de rojez relativo; χ_f = susceptibilidad de baja frecuencia; χ_{hf} = susceptibilidad de alta frecuencia; $\chi_{df}^{\circ}/\%$ = susceptibilidad dependiente de la frecuencia.

En este estudio la profundidad del efecto de la quema agrícola fue de hasta 4 cm tal como se reporta en otros estudios para suelos en ambientes no agrícolas (DeBano, 2000; Shakesby *et al.*, 2015). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que cada suelo es diferente en mineralogía, en la transmisión del calor y en la cantidad y calidad de materia orgánica, factores que propician respuestas diferentes ante una quema agrícola (Massman, 2012), por lo que los resultados de este estudio son validos solo para este grupo de suelo, el Vertisol, que por ser un suelo arcilloso es un aislante térmico natural.

Al ser el suelo un aislante térmico y más en el caso de los suelos arcillosos del grupo Vertisol, la transferencia de calor y, por ende, los efectos de la quema agrícola de baja intensidad y duración tuvieron efecto a muy baja profundidad.

La intensidad y duración del fuego es una perturbación que puede ser positiva, negativa o neutra dependiendo del suelo (Alcañiz *et al.*, 2018), por lo que tener indicadores rápidos como el color y los parámetros magnéticos, ambos pueden ser de utilidad en estudios de monitoreo.

Diversos estudios revelan que los suelos se pueden recuperar después del uso del fuego agrícola y forestal (Certini, 2005); sin embargo, se hace necesario conocer las respuestas de diversos grupos de suelo a diversos tiempos e intensidades del fuego. En el caso de la caña de azúcar, este

cultivo se desarrolla en una gran diversidad de suelos, como son: Luvisols, Vertisols, Cambisols, Leptosols, Gleysols, Acrisols, Fluvisols, entre otros (Bautista *et al.*, 2000), por lo que este tipo de estudios apenas comienzan en México.

5. Conclusiones

La quema agrícola en cultivos de caña de azúcar sobre Vertisols de Tabasco, México provoca cambios en la mineralogía del suelo hasta los 4 cm de profundidad.

Los parámetros y los índices de color, así como los parámetros magnéticos permitieron identificar

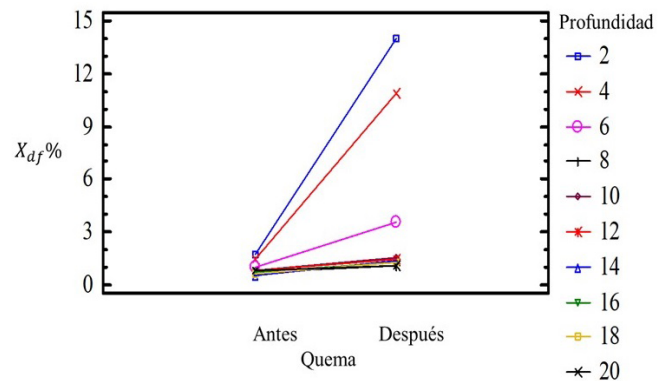


Figura 6 La interacción de factores quema y profundidad que muestran los cambios en la susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia.

los cambios en el suelo que provoca una quema agrícola de baja intensidad y duración. El color y la susceptibilidad magnética concuerdan con la medición y modelación numérica de la difusión de la temperatura.

La luminosidad, susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia y la susceptibilidad magnética de alta frecuencia pueden ser considerados indicadores rápidos y confiables de los efectos de la quema agrícola.

Contribución de los autores

LIM realizó los análisis de color y de los parámetros magnéticos, los análisis de datos y la escritura de la primera versión del manuscrito. RGR, asesoró los análisis del color y de los parámetros magnéticos, revisó las diversas versiones del manuscrito. RS. Trabajo de campo, muestreo de suelos antes y después de la quema, mediciones de temperatura de la quema en superficie y debajo del suelo, elaboración del mapa de localización. AG conceptualización, consiguió el financiamiento, fue co-coordinador del proyecto junto con F. Bautista, y revisó el manuscrito. FB conceptualización, diseño del experimento en campo y definición de los parámetros a medir, análisis de datos, redacción, corrección y edición del manuscrito, interpretación, consiguió el financiamiento y fue el coordinador del proyecto.

Financiamiento

Los autores agradecen el apoyo financiero del CONACYT al proyecto CB-283135. FBZ agradece el apoyo de la DGAPA-UNAM para la estancia sabática en el COLPOS, Tabasco.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no hay conflicto de interés.

Referencias

- Acevedo-Sandoval, O., Cruz-Sánchez, M., Cruz-Chávez, E., 2002, Distribución de óxidos de Fe, Al y Si en horizontes endurecidos de origen volcánico: *Agrociencia*, 36, 401-409.
- Afif Khouri, E., Oliveira-Prendes, J.A., 2006, Efectos del fuego prescrito sobre matorral en las propiedades del suelo: *Investigación Agraria*, 15(3), 262-270.
- Aguilar Rivera, N., Olvera Vargas, L. A., Galindo-Mendoza, G., 2013, Evaluación de aptitud de tierras al cultivo de caña de azúcar en la Huasteca potosina, México, por técnicas geomáticas: *Revista de Geografía Norte Grande*, (55), 141-156. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022013000200010>
- Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., Úbeda, M., 2018, Effects of prescribed fires on soil properties: A review: *Science of The Total Environment*, 613-614, 944-957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.144>
- Babanin, V.F., Ivanov, A.V., Morozov, V.V., Shpil'kina, I.V., 1998, A comparative study of the status of iron compounds based on evidence of Mössbauer spectroscopy and magnetic measurements: *Eurasian Soil Science*, 31, 846-853.
- Barret, L.R., 2002, Spectrophotometric color measurement in situ in well drained sandy soils: *Geoderma*, 108, 49-77. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00121-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00121-0)
- Bautista, F.J., Cejudo-Ruiz, R., Aguilar-Reyes, B., Goguichaishvili, A., 2014, El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: una revisión: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 365-376. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2014v66n2a11>
- Bautista, F.J., Durán-de-Bazua, C., Villatoro-Resendiz, J., 2000, La materia orgánica soluble en el mejoramiento de los suelos tropicales, en Quintero Lizalao, R., (Ed.), *La edafología y sus perspectivas al siglo XXI: México*, Colegio de Postgraduados, Universidad Nacional Autónoma de México

- y Universidad Autónoma de Chapingo, 247-253.
- Cabrera, J.A., Zuaznábar, C.R., 2010, Impacto sobre el ambiente del monocultivo de la caña de azúcar con el uso de la quema para la cosecha y la fertilización nitrogenada: I. Balance del Carbono: Cultivos Tropicales, 31(1), 5-13.
- Cançado J.E.D., Saldiva Paulo, H.N., Pereira Luiz, A.A., Lara Luciene, B.L.S., Artaxo Paulo, Martinelli Luiz A., Arbex Marcos, A., Zanobetti Antonella, Braga Alfesio L.F., 2006, The impact of sugar cane-burning emissions on the respiratory system of children and the elderly: Environmental Health Perspectives, 114(5), 725-729. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.8485>
- Carlos, A., Bigham, I. J., Rhoton, F.E., Traina, S.J., 1999, Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil: Clays and Clay Minerals, 47, 466-473. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1999.0470408>
- Certini, G., 2005, Effects of fire on properties of forest soils: a review: Oecología, 143, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Cortés, J.L., Bautista, F., Quintana, P., Aguilar, D., Goguichaishvili, A., 2015, The color of urban dust as indicator of contamination by the potentially toxic elements: the case of Ensenada, Baja California México: Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 21(3), 255-266.
- Cohen, J., 1988, Statistical power analysis for the behavioral sciences, 2nd ed.: New York, La Wrence Erlbaum Associates, 567p.
- Cruz-Pons A., Zavala-Cruz, J., Guerrero-Peña A., Salgado-García, S., Lagunes-Espinoza, L.C., Gavi-Reyes F., 2012, Metales pesados en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa Tabasco: Universidad y Ciencia, 28(2), 119-130.
- DeBano L.F., 2000, The role of fire and soil heating on water repellence in wildland environments: A review: Journal of Hydrology, 231-232, 195-206. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00194-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00194-3)
- Dearing, J.A., 1999, Environmental magnetic susceptibility, Using the Bartington MS2 system: Inglaterra, British Library, 54, 104p.
- Dinardo-Miranda, L.L., Vilela-Franco J., 2013, Sugarcane Straw and the populations of pests and nematodes: Scientia Agricola, 70(5), 369-374. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500012>
- 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.
- Evans, M., Heller F., 2003, Environmental magnetism, principles and applications of enviromagnetics: New York, Academic Press, 299p.
- Ferreira, A.J.D., Coelho, C.O.A., Boulet, A.K., Lopes, F.P., 2005, Temporal patterns of solute loss following wildfires in Central Portugal: International Journal of Wildland Fire, 14, 401-412. <https://doi.org/10.1071/WF05043>
- García, E., 2004, Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen: México, Instituto de Geografía, UNAM, 90 p.
- 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 de Ciencias Forestales y del Ambiente, 26(1), 315-327. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.01.002>
- González-Campos R., García-Ruiz R., 2013, Fast integration of one-dimensional boundary value problem: International Journal of Modern Physics C., 24(11), 1350082. <https://doi.org/10.1142/S0129183113500824>
- González, C.C., Studdert, G.A., Kunst, A., Albanesi, A. 2001, Comportamiento de algunas propiedades del suelo en una sabana

- del chaco semiárido occidental bajo distintas frecuencias de fuego: *Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*, 19(2), 92-94.
- González-Villa, F.J., Almendros, G., 2011, El controvertido efecto de los incendios: el fuego en el ciclo del carbono en los ecosistemas mediterráneos: *Métode*, 70, 83-87.
- Granged, A.J., Zavala, L. M., Jordán, A., Bárcenas-Moreno, G., 2011, Post-fire evolution of soil properties and vegetation cover in a Mediterranean heathland after experimental burning: A 3-year study: *Geoderma*, 164(1-2), 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.05.017>
- Harden, J.W., 1982, A quantitative index of soil development from field descriptions: examples from a chronosequence in central California: *Geoderma*, 28, 1-28. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(82\)90037-4](https://doi.org/10.1016/0016-7061(82)90037-4)
- Heydari, M., Rostamy, A., Najafi, F., Dey, D., 2016, Effect of fire severity on physical and biochemical soil properties in Zagros oak (*Quercus Branti Lindl.*) forest in Iran: *Journal of Forestry Research*, 28(1), 95-104. <https://doi.org/10.1007/s11676-016-0299-x>
- Hunt, C., Moskowitz, B., Banerjee, S., 1995, Magnetic properties of rocks and minerals, in Ahrens, T.J., (ed.), *Rock physics and phase relations: A handbook of physical constants: U.S.A., American Geophysical Union, reference shelf*, 3, 189-204.
- Kapper, K.L., Bautista, F., Goguichaishvili, A., Felicidad-Bogalo, M., Cejudo-Ruiz, R., Cervantes-Solano, M., 2020, The use and misuse of magnetic methods to monitor environmental pollution in urban areas: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(1), 1-44. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2020v72n1a111219>
- Kirillova, N. P., Vodyanitskii, Yu. N., Sileva, T. M., 2015, Conversion of Soil Color Parameters from the Munsell System to the CIE-L*a*b* System: *Eurasian Soil Science (Genesis and Geography of soils)*, 48(5), 468-475. doi.org/10.1134/S1064229315050026
- Korologe, I.S.A., Weerasinghe, P., Silva, N.R.N., De Silva, C.S., 2015, The Determination of available phosphorous in soil: A quick and simple method, *OUS Journal*, 8, 1-17. <http://dx.doi.org/10.4038/ouslj.v8i0.7315>
- Lázaro-Sánchez, G. R., Bautista F., Goguitchaichvili A., López-Noverola, U., Sánchez-Hernández, R. 2021, Efecto de la quema agrícola en un Vertisol de Tabasco México: fósforo, pH y conductividad eléctrica: *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24, 1-10.
- Liu, Q., Roberts, A. P., Larrasoña, J. C., Banerjee, S. K., Guyodo, Y., Tauxe, L., Oldfield, F., 2012, Environmental magnetism: Principles and applications: *Reviews of Geophysics*, 50(4), RG4002. <https://doi.org/10.1029/2012RG000393>
- Maher, B.A., 1986, Characterisation of soils by mineral magnetic measurements: *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 42(1-2), 76-92. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(86\)80010-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(86)80010-3)
- Massman, W.J., 2012, Modeling soil heating and moisture transport under extreme conditions: Forest fires and slash pile burns: *Waters Resource Research*, 48, W10548. <https://doi.org/10.1029/2011WR011710>
- Nearby, D.G., Klopatek, C.C., DeBano, L.F., Ffolliott, P.F. 1999, Fire effects on belowground sustainability: A review and synthesis: *Forest Ecology and Management*, 122, 51-71. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00032-8)
- Nearby, D.G., Ryan, Kevin C., De Bano, Leonard, F., 2005, Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water: *General Technical Report: USA, Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station*, 250p.
- Ortiz, L., Hipólito, S., García, S., Castelán, E., Mepivoseth, S., Cordova, S., 2012, Perspectivas de la cosecha de la caña de azúcar cruda en México: *Revista Mexicana*

- de Ciencias Agrícolas, 3(4), 767-773.
- Pannalal, J., Crowe, S.A., Cioppa, M.T., Symons, D.T.A., Sturm, A., Fowle, Y.D.A., 2005, Room-temperature magnetic properties of ferrihydrite: A potential magnetic remanence carrier: *Earth and Planetary Science Letters*, 236, 856–870. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.05.019>
- Pyne, S.J., 2001, *Fire: a brief history*: Weyerhaeuser Environmental Books, Cycle of Fire Series: Seattle, USA, University of Washington Press, 224p.
- R Core Team, 2020, R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/foundation/>
- Raison, R.J., 1979, Modification of the soil environment by vegetation fires, with particular refer-ence to nitrogen transformations: A review. *Plant and Soil*, 53,73-108. <https://doi.org/10.1007/BF02205929>
- Redin, M., Dos Santos, G. d. F., Miguel, P., Denega, G., Lupatini, M., Doneda, A., Lorensi, de Souza, E., 2011, Impactos da queima sobre atributos químicos, físicos e biológicos do solo: *Ciencia Florestal*, Santa Maria, 21(2), 381-392.
- Roberts, A.P., Chang, L., Rowan, C.J., Horng, C.S., Florindo, F., 2011, Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe₃S₄): An update: *Reviews of Geophysics*, 49(1), 1-46. <https://doi.org/10.1029/2010RG000336>
- Roy, D.P., Boschetti, L., Maier, S.W., Smith, A.M. S., 2010, Field estimation of ash and char colour-lightness using a standard grey scale: *International Journal of Wildland Fire*, 19, 698-704. <https://doi.org/10.1071/WF09133>
- Sánchez-Marañón, M., Delgado, G., Delgado, R., Pérez, M., Melgos, A.M., 1995, Spectroradiometric and visual color measurements of disturbed and undisturbed soil samples: *Soil Science*, 160(4), 291-303.
- Sandgren, P., Snowball, I., 2001, Application of mineral magnetic techniques to paleolimnology, in Last, W.M., Smol, J.P., (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: USA*, Springer, 217-237. https://doi.org/10.1007/0-306-47670-3_8
- SEMARNAT/SAGARPA, 1999, Proyecto de Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-1997: México, Diario oficial de la Federación. Gobierno de México.
- Shakesby, R.A., Bento, C.P.M., Ferreira, C.S.S., Ferreira, A.J.D., Stoof, C., Urbanek E, Walsh, R.P.D., 2015, Impacts of prescribed fire on soil loss and soil quality: An assessment based on an experimentally-burned catchment in central Portugal: *Catena*, 128, 278-293. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.03.012>
- Schwertmann, U., 1993, Relations between iron oxides, soil color, and soil formation, in Bigham, M., Giolkosz, E.J. (Eds.), *Soil color: USA*, Soil Science Society of America, 51-69. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub31.c4>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2022, Consulta en línea. https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/. Fecha de consulta: 13 de marzo de 2023.
- Solla, F.G., Rodríguez, S.R, Merino, A., 2012, Evaluación del aporte de cenizas de madera como fertilizante de un suelo ácido mediante un ensayo en laboratorio: *Investigación agraria: Producción y Protección Vegetales*, 16, 379-380.
- Sommers, W., Loehman, R., Hardy, C., 2014, Wildland fire emissions, carbon and climate: Science overview and knowledge needs: *Forest Ecology and Management*, 317, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.014>
- Thomson. R., Oldfield F., 1986, *Environment magnetism*: London, George Allen and Unwin, 354P.
- Ubeda, X., Pereira, P., Outeiro, L., Martin, D., 2009, Effects of fire temperature on the

- physical and chemical characteristics of the ash from two plots of cork oak (*Quercus suber*): *Land Degradation & Development*, 20(6), 589–609. <https://doi.org/10.1002/ldr.930>
- Valencia-González, Y., 2011, Biomineralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales en un suelo tropical de la ciudad de Medellín: Medellín, Universidad Nacional de Colombia, Tesis Maestría.
- Velázquez-García, J.J., Oleschko, K., Muñoz-Villalobos J., Velásquez-Valle A., Miguel A., Girón-Ríos, Y., Martínez-Menes, M., Figueroa-Sandoval, B., 2007, El color del Andosol como un indicador de su calidad física bajo el manejo: *Terra Latinoamericana*, 25(1), 1-8.
- Viscarra-Rossel, R.A., Fouad, Y., Walter, C., 2008, Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents: *Biosystems Engineering*, 100(2), 149–159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.02.007>.
- Vodyanitskii, Y.N., Savichev, A.T., 2017, The influence of organic matter on soil color using the regression equations of optical parameters in the system CIE-L*a*b*: *Annals of Agrarian Science*, 15(3), 380–385. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aasci.2017.05.023>