



Efecto de la Quema de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) Sobre las Propiedades de los Suelos Agrícolas en la Zona Kárstica del Sur de Quintana Roo

Fragoso-Servón Patricia

Pereira Corona Alberto

Prezas Hernández Benito

Departamento de Recursos Naturales. Universidad de Quintana Roo,
Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort, colonia Del Bosque.
Chetumal, Quintana Roo, Mexico

[Doi:10.19044/esj.2023.v19n6p330](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n6p330)

Submitted: 08 November 2022

Accepted: 21 February 2023

Published: 28 February 2023

Copyright 2023 Author(s)

Under Creative Commons BY-NC-ND

4.0 OPEN ACCESS

Cite As:

Fragoso-Servón P., Pereira Corona A. & Prezas Hernández B. (2023). *Efecto de la Quema de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) Sobre las Propiedades de los Suelos Agrícolas en la Zona Kárstica del Sur de Quintana Roo*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (6), 330. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n6p330>

Resumen

Existe una gran controversia respecto al uso de quemas controladas en agricultura. La mayor parte de las investigaciones van dirigidas hacia: el efecto sobre los microorganismos, la pérdida de la materia orgánica y la contaminación del aire. La quema contribuye a reducir la materia orgánica sobre el suelo, fuente de macro y micronutrientes. Nutrientes que son reincorporados en los suelos agrícolas principalmente a través del uso de fertilizantes. El objetivo de este trabajo fue analizar los cambios físicos y químicos que produce la quema en el suelo sometido a cultivo intensivo de caña en la zona kárstica del sur de Quintana Roo, México. Al analizar las propiedades físicas en los primeros 20 cm de profundidad en un suelo Gleysol antes y después de la quema controlada se encontraron cambios en la textura y el patrón de distribución de arcillas y limos respecto a profundidad con una visible migración de arcillas hacia niveles inferiores. El contenido de carbono orgánico varió poco en los perfiles analizados, indicando un efecto menor de la quema sobre esta variable. Se encontraron pequeños cambios en las concentraciones de K, Ca y Mg; solo fueron estadísticamente significativos

los cambios en Na y P, tanto en sus concentraciones como en la distribución de estos elementos respecto a profundidad. La dinámica de los suelos kársticos es diferente a otros por el elevado contenido de CaCO_3 que interfiere en el comportamiento físico y químico del suelo y en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, por lo que se hace evidente la necesidad de profundizar estos estudios en otros tipos de suelo usados con el mismo fin en estos ambientes kársticos.

Palabras clave: Quema agrícola, karst, carbono, fósforo, caña

Effect of fire on the properties of agricultural soils in the karst zone of southern Quintana Roo

Fragoso-Servón Patricia

Pereira Corona Alberto

Prezas Hernández Benito

Departamento de Recursos Naturales. Universidad de Quintana Roo,
Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort, colonia Del Bosque.
Chetumal, Quintana Roo, Mexico

Abstract

There is great controversy regarding the use of controlled burning in agriculture. Most of the investigations are directed towards the effect on microorganisms, the loss of organic matter and air pollution. Burning contributes to reducing organic matter on the soil, a source of macro and micronutrients. Nutrients that are reincorporated into agricultural soils mainly using fertilizers. The objective of this work was to analyze the physical and chemical changes produced by burning in the soil subjected to intensive sugarcane cultivation in the karstic zone of southern Quintana Roo, Mexico. When analyzing the physical properties in the first 20 cm of depth in a Gleysol soil before and after controlled burning, changes were found in the texture and distribution pattern of clays and silts with respect to depth with a visible migration of clays towards lower levels. The organic carbon content varied little in the analyzed profiles, indicating a minor effect of burning on this variable. Small changes were found in the concentrations of K, Ca, and Mg; Only the changes in Na and P were statistically significant, both in their concentrations and in the distribution of these elements with respect to depth. The dynamics of karstic soils is different from others due to the high content of CaCO_3 that interferes with the physical and chemical behavior of the soil and the availability of nutrients for plants, which is why it is evident the need

to deepen these studies in other types of soil used for the same purpose in these karstic environments.

Keywords: Agricultural burning, karst, carbon, phosphorus, cane

Introducción

La caña de azúcar es un cultivo perenne característico de las zonas cálidas húmedas y subhúmedas del planeta, de ella se obtienen cuatro productos principalmente azúcar, piloncillo, fruta (caña) y forraje.

La producción a nivel mundial de acuerdo con los datos de ISO (2022) es de casi 174.11 millones de toneladas y abarca un área de 24 millones de hectáreas siendo los principales países productores Brasil, India, China

En México hay 55 ingenios azucareros distribuidos en 15 estados de la República, para el ciclo 2021-2022 se reportó actividad en 49 de ellos abarcando una superficie cosechada de 799,774 hectáreas, con una producción de 54.680,830 toneladas de caña y 6.185,050 toneladas de azúcar (CONADESUCA, 2022).

Dentro de las prácticas de cultivo tradicionales se realizan una o dos quemas al año, la primera antes de la cosecha y la segunda posterior a la cosecha. La quema es una práctica que se realiza por las características particulares que tiene el cultivo y por el contexto social y económico en que esa agroindustria se desenvuelve (Chaves y Bermúdez, 2006).

Derivado de esta práctica se han realizado diversas investigaciones sobre el efecto que tienen las quemas sobre las poblaciones de microorganismos del suelo (Goberna et al., 2012; Pineda y Lizarazo, 2013), sobre el efecto en los contenidos de carbono en el suelo (Torres et al., 2004; Cabrera y Zuaznábar, 2010; Goberna et al., 2012), los efectos sobre la contaminación atmosférica y emisora de gases de efecto invernadero y daños a la salud de las poblaciones aledañas (Fearmside, 2000, Dávalos, 2007; Silva et al., 2011; Flores, et al., 2016) y sobre cambios en la fertilidad del suelo para calcular dosis de fertilizantes (Salgado et al. 2000, 2003, 2005; Palma et al. 2002; Karlen et al., 2003).

Hay pocos estudios sobre los efectos de la quema sobre las propiedades del suelo, la mayoría desde el punto de vista del efecto de los incendios forestales en zonas templadas como los realizados por Úbeda (2021) y Celis et al., (2013) en España, Coldwel et al. (2002) en Estados Unidos, Valdes (2016) en Cuba y Capulín et al., (2010) en México.

En el caso de la caña de azúcar, la quema controlada se hace cada año a lo largo de 10 a 15 años de producción continua antes de dejar descansar el suelo por un par de años para volver a ser sembrada, no hay forma de recuperación como en el caso de la vegetación natural siniestrada en los incendios forestales.

Hay opiniones tanto a favor como en contra de las quemas, algunos consideran que no son necesarias y que contaminan el aire, otros consideran que es una práctica que solo favorece las condiciones de la mano de obra para la cosecha (Crovetto, 1992; Molina et al., 2002; Ripoli, 2000; Sentiés et al., 2014) y en el suelo la mayor pérdida es de la materia orgánica Hartemik (1998), Molina et al. (2002), Salgado et al. (2000), Hernández y López (2002) indican que la quema de la materia orgánica no permite que se obtengan de esta forma los nutrientes que la planta necesita de manera natural, a cambio de ello en las zonas de cultivo de caña se debe subsidiar a la planta a través del uso de fertilizantes aplicando dosis excesivas generales para toda la zona sin considerar los contenidos de nutrientes del suelo como indican Salgado et al. (2000, 2005) y Palma et al. (2002).

Aún con la información disponible hasta ahora, el uso de la quema controlada para el mantenimiento de los sistemas naturales y agropecuarios sigue siendo un tema conflictivo, el efecto del fuego sobre el suelo es variable, depende de varios factores como las temperaturas alcanzadas, la duración, la frecuencia de quemas, el tipo de vegetación o cultivo y el grado de incorporación de las cenizas (Hepper et al., 2008) trayendo como consecuencia la pérdida de nutrientes o favorecer la mineralización de la materia orgánica.

A pesar del uso frecuente del fuego en la producción de caña en México donde se realiza principalmente la quema precosecha, es escasa la información disponible del efecto que este tiene sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos agrícolas (Domínguez, 2016) y en especial en los suelos kársticos de la Península de Yucatán.

Esta investigación tiene por objetivo analizar el efecto que tiene la quema de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en las propiedades físico - químicas del suelo en la zona cañera del sur de Quintana Roo.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La zona de cultivo de caña en Quintana Roo se encuentra en la porción sur bajo la administración del ingenio de San Rafael de Pucté, el cual trasciende en la actividad económica y social del estado, abarca 13 ejidos a lo largo de la Riviera del río Hondo con una superficie cosechada de 32.676 hectáreas, una producción de 1.774.069 toneladas de caña y un rendimiento de 54 toneladas por hectárea (rendimiento máximo reportado en 2012 es de 114 ton/ha y el mínimo de 46,8 ton/ha) (CONADESUCA, 2022).



Figura 1. Localización del área de estudio.

En la zona predominan planicies subhorizontales y ligeramente diseccionadas con algunos acolinamientos, el clima es cálido subhúmedo con una temperatura media anual es de 26,7°C y una precipitación anual de 1307 mm, los grupos de suelo dominantes en el área son Gleysol, Vertisol, Luvisol y en menor escala Leptosol (INIFAP, 2012; Fragoso et al., 2016).

El estudio se realizó en el ejido Álvaro Obregón en un predio de 16 hectáreas ubicado en el lugar llamado “El Zapote” con coordenadas 18°18’50” latitud norte y 89°42’11” longitud oeste (Figura 1), en un cultivo de caña de 10 años en producción con una altura promedio de 3 m y sin plagas sobre un suelo Eutric Gleysol (Clayic, Vertic), el más representativo y abundante en el área, cuyas características distintivas son el alto contenido de arcillas, problemas hidromórficos, predominancia de reacciones de reducción lo que favorece las coloraciones grisáceas (WRB, 2015).

Metodología

Para identificar los efectos de la quema, se realizaron dos muestreos en el intervalo de un ciclo productivo, el primero cuando el cultivo alcanzó su máximo desarrollo y el segundo después de la quema y cosecha de este.

Se siguieron las metodologías de muestreo y análisis de Siebe et al. (1996) y la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000) (SEMARNAT, 2002). Se utilizó el diseño por zigzag para el muestreo, tomando 10 puntos, cada punto fue georreferenciado, se eliminó la hojarasca y el horizonte orgánico; a partir del horizonte mineral, se tomaron muestras

cada 2 cm hasta llegar a una profundidad de 20 cm (Figura 2), cada muestra fue secada a la sombra, molida y tamizada con malla de 2mm, para los análisis físicos y químicos.



Figura 2. Muestreo cada 2 cm de profundidad

Se evaluaron las propiedades físicas y químicas previo a la quema y posterior a la quema: estructura, estabilidad de agregados, color por tablas Munsell, textura por hidrómetro de Bouyoucos, pH 1:2 agua, materia orgánica (MO) y carbono orgánico (CO) Walkley-Black, conductividad eléctrica (CE) 1:5 agua, fósforo (P) Bray y cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) por extracción con solución de acetato de amonio y posteriormente Ca^{2+} y Mg^{2+} por absorción atómica y K^+ y Na^+ con la técnica de emisión atómica.

Para evaluar las temperaturas del suelo durante la quema se utilizaron placas de cerámica cruda (sin vidriado) de 10 por 5 cm con pintura termosensible poniendo en cada una de ellas líneas de registro verticales de 5 cm de altura, teniendo siete indicadores de temperaturas (90-130°C, 130-150°C, 150-180°C, 180-220°C, 230-260°C, 320-340°C, 590-630°C). Cada placa fue enterrada junto al pozo de muestreo de modo tal que las líneas de pintura abarcaran los primeros cinco centímetros de profundidad del suelo, de manera análoga a lo realizado por González (2011) y Campo (2012). La temperatura superficial durante la quema se midió usando un pirómetro laser portátil.

Los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis de comparación de medias pre y post quema por propiedad y por profundidad usando el software SYSTAT v 13, (versión de prueba), al tratarse de dos

condiciones y dos criterios, antes y después de la quema y profundidad y propiedad, se forman seis grupos lo que hace recomendable un análisis ANOVA o análisis de varianzas para determinar si los valores medios para cada combinación pertenecen a una sola población de datos o más. Considerando el valor de una desviación estándar de los datos como criterio para determinar la diferencia entre valores, en todos los casos los datos comparados son resultante de las medias de dichos parámetros ya sea por perfil o por profundidad (Kohli et al,2003).

En cuanto a la posible relación entre los diferentes parámetros medidos, se hizo un análisis de correlación simple entre las condiciones de pre y post quema ($\alpha = 0,05$) para determinar si existen modificaciones al patrón de distribución en profundidad de cada una de las propiedades medidas, como criterio para determinar la posibilidad de que los resultados sean producto del azar (la aleatoriedad de los datos), el software utilizado fue SYSTAT v.13, (versión de prueba)..

Resultados y Discusión

Temperatura

Durante la quema en la superficie del suelo, las temperaturas registradas estuvieron por encima de los 200°C, registrándose valores máximos de hasta 500°C. En el perfil del suelo las temperaturas registradas en los primeros 5 cm de profundidad produjeron cambios en las pinturas térmicas de 90-130°C, 130-150°C y 150-180°C. (Figura 3).

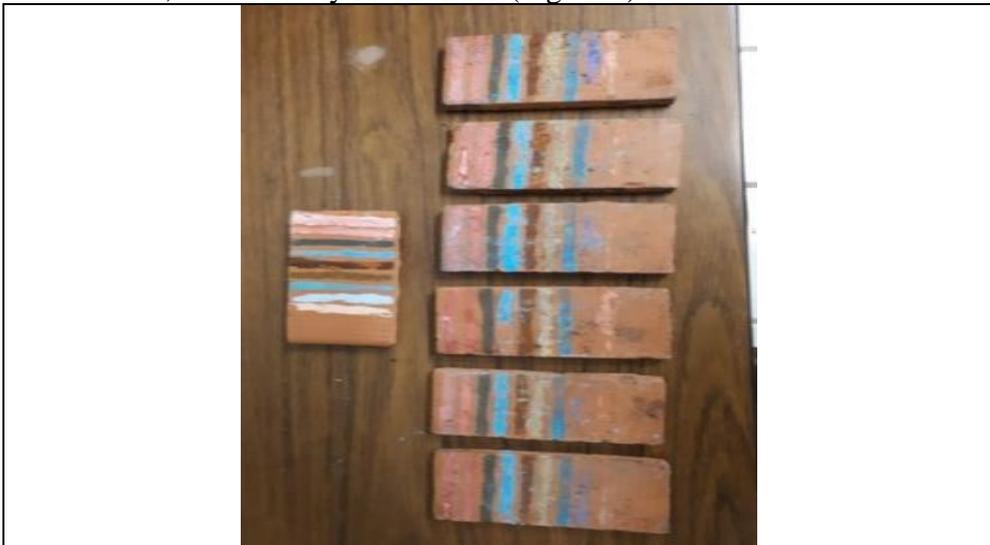


Figura 3. Placa de cerámica con indicadores de temperatura.

Las temperaturas alcanzadas pueden determinar la influencia del fuego sobre las propiedades tanto físicas como las químicas del suelo. Soto et al.

(1991) y Capulín et al., (2010, 2018) coinciden en que por debajo de los 170°C se favorece las pérdidas por volatilización, por encima hay una deshidratación de las partículas y se favorece la degradación de la materia orgánica. Entre 220 y 460°C además se producen procesos de disolución y movimiento de materiales y la posible liberación de nutrientes, las temperaturas mayores a 500°C alteran el ciclo de nutrientes.

Propiedades físicas

Color

De acuerdo con las tablas de color Munsell, el suelo antes de la quema tiene un color en seco 10YR 4/2 (café grisáceo muy oscuro) con variaciones de Value de 3,4 y 5 y en húmedo 10YR 3/1 (gris muy oscuro) con variaciones del Chroma entre 1,2 y 3.

Después de la quema y cosecha solo se aprecia cambio por encima de los primeros 10 cm en el Chroma a valores de 1 y 2 indicando un color más oscuro (café oscuro). No hay cambios significativos en el color tanto en seco como en húmedo por debajo de los 10 cm.

Este oscurecimiento de color presente en los primeros centímetros puede ser debido a la quema de la materia orgánica y la presencia de cenizas depositadas en la superficie. Este fenómeno coincide con lo reportado por la mayoría de los autores que estudian el efecto del fuego como Celis et al. (2013)

Estructura y estabilidad de agregados

En toda la profundidad estudiada la estructura dominante en ambos muestreos es de bloques subangulares, teniendo en promedio un diámetro de 1,23 cm (de 0,5 a 2,26 cm) en pre-quema y en pos-quema los bloques tienen un promedio de 1,03 cm en un intervalo de valores que van de 0,6 cm a 1,5 cm.

De acuerdo con la técnica de Siebe et al. (1996) los agregados presentan una estabilidad de mediana a alta en ambos muestreos, en pre-quema domina la estabilidad media y en el caso de pos-quema domina la estabilidad alta.

La diferencia entre el tamaño de pre y pos-quema y la estabilizas de agregados puede estar relacionada con la pérdida de humedad debida al calor y como consecuencia la ruptura de los bloques.

Con la temperatura alcanzada durante la quema los agregados se deshidrataron, se agrietaron y se fragmentaron, dando una mayor estabilidad después de la quema por haber un proceso de cementación interna, el mismo fenómeno fue reportado por Soto et al. (1991) trabajando con Cambisoles (suelos ricos en arcillas) en donde definieron que las temperaturas por debajo de 220°C deshidratan los agregados del suelo, a su vez Celis et al. (2013) en la zona mediterránea encontraron que las arcillas por el calentamiento

generaron agregados más estables y la combustión del material orgánico destruye los agregados del suelo, puede inducir a la cementación de los mismos y dar lugar a la presencia de compuestos hidrofóbicos que favorecen la estabilidad de los agregados.

Los valores de las propiedades físicas en la pre-quema son relativamente homogéneos a lo largo de los 20 cm del perfil, lo que permite suponer una cierta homogeneidad en el comportamiento de esta capa de suelo respecto a la capacidad de conducción térmica al menos en los 20 cm de profundidad estudiados.

Textura

Dentro de las propiedades físicas es en la textura donde se encontraron mayores cambios. En pre-quema se observa un incremento en el contenido de arcillas de 45 a 52% con la profundidad, los limos se mantienen esencialmente constantes a lo largo del perfil y las arenas disminuyen de 41 a 32% en el mismo intervalo de profundidad (Figura 4).

Es claro que a mayor profundidad hay más arcillas y menos arenas, este es un proceso de arrastre mecánico y acomodo de las partículas que se ve favorecido con las fuertes lluvias típicas de la zona de estudio.

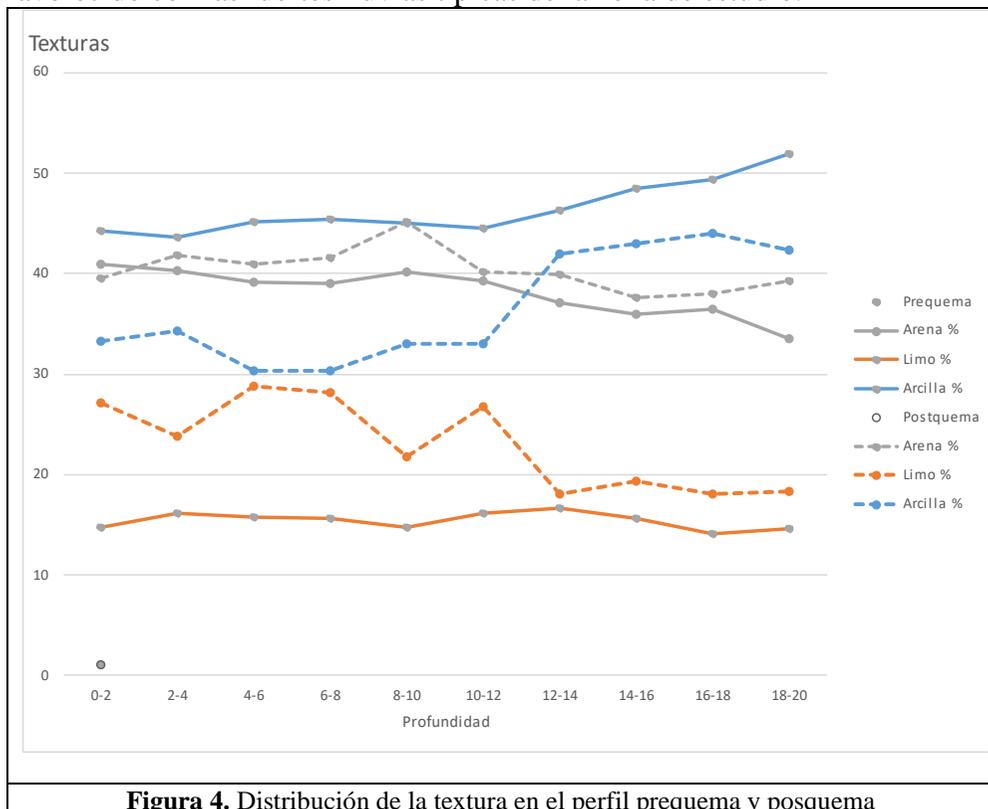


Figura 4. Distribución de la textura en el perfil prequema y posquema

En la pos-quema se observa un aumento en el contenido de limos y disminuye el contenido de arcillas, las arenas se mantienen relativamente en la misma proporción en el perfil, el porcentaje de arcillas es menor (34-42%) pero conserva el mismo comportamiento en profundidad (menor contenido en la superficie y mayor en la profundidad). En cambio, para los limos se observa un mayor contenido (28-18%) y su patrón de distribución respecto a la profundidad va disminuyendo de manera irregular.

Para las tres texturas entre los 4 y 12 cm de profundidad hay una mayor irregularidad en sus contenidos, lo que podría estar asociado con el aumento de temperatura y el desarrollo radicular de la caña de azúcar a dicha profundidad.

Este comportamiento fue igualmente reportado por varios autores como Úbeda (2001); Hepper et al. (2008) y Celis et al. (2013), ellos encontraron que las altas temperaturas favorecen la descomposición térmica de las arcillas, liberando compuestos amorfos de sílice y aluminio y óxidos e hidróxidos de hierro que actúan como cementantes aumentando el tamaño de las partículas.

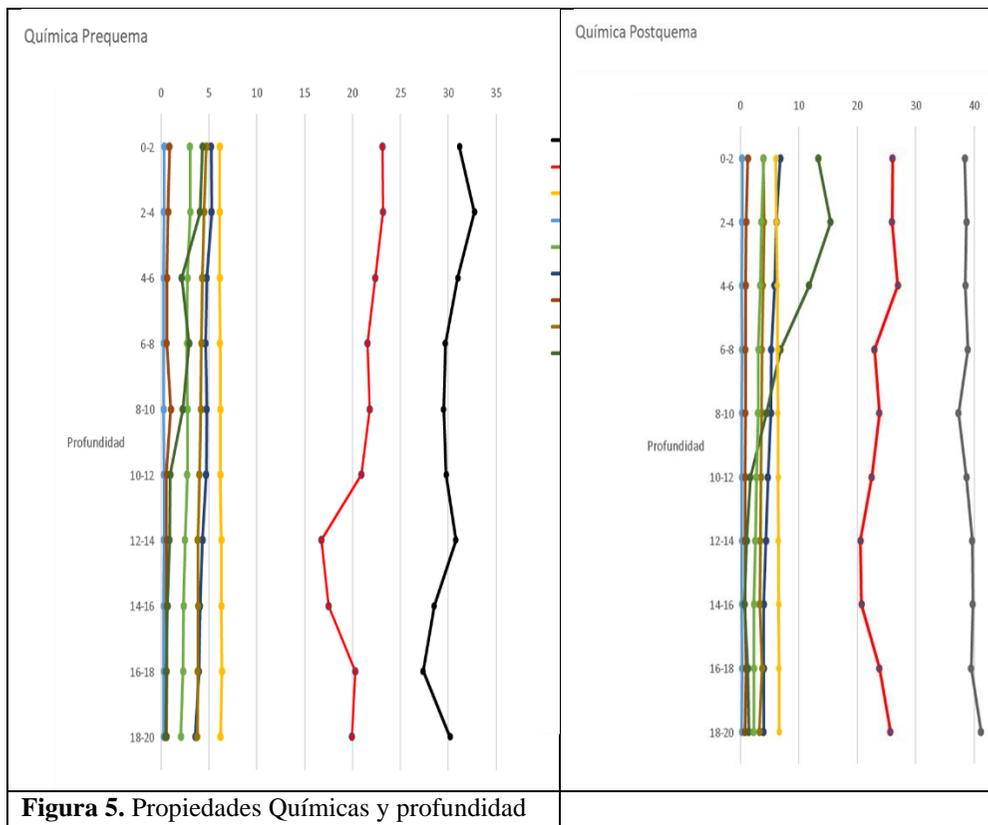
Propiedades químicas

Las concentraciones de las variables químicas en pre y pos-quema se encuentran en la Figura 5 y 6. En cuanto a la concentración relacionada con la profundidad se observa de manera general que las mayores concentraciones están en la parte superior del perfil y disminuyen conforme se desciende en profundidad (Figura 5 y cuadro 1).

Cuadro 1. Comparación de las variables químicas pre y post quema.

Prof.	pH		CE		CO		MO		K		Na		Mg		Ca		P	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post								
0-2	6,1	6,1	0,3	0,3	3,0	4,0	5,2	6,8	0,9	1,3	31,2	38,4	4,7	3,9	23,2	26,0	4,3	13,3
2-4	6,1	6,2	0,3	0,3	3,1	3,6	5,3	6,2	0,7	1,0	32,7	38,7	4,5	4,1	23,2	26,0	4,1	15,4
4-6	6,1	6,3	0,3	0,3	2,8	3,4	4,8	5,8	0,6	0,9	31,0	38,5	4,3	3,9	22,4	26,9	2,2	11,8
6-8	6,2	6,4	0,3	0,3	2,7	3,1	4,7	5,3	0,6	0,9	29,7	38,9	4,2	3,7	21,6	22,9	2,9	6,9
8-10	6,2	6,4	0,3	0,3	2,8	3,0	4,8	5,2	1,0	0,9	29,5	37,3	4,2	3,6	21,8	23,8	2,3	4,5
10-12	6,2	6,5	0,3	0,3	2,7	2,7	4,7	4,7	0,6	0,8	29,8	38,7	4,0	3,5	21,0	22,5	1,0	1,7
12-14	6,3	6,5	0,3	0,3	2,5	2,5	4,3	4,4	0,6	0,8	30,8	39,6	3,8	3,4	16,8	20,5	0,9	1,1
14-16	6,3	6,6	0,3	0,3	2,4	2,3	4,1	4,0	0,6	0,8	28,5	39,8	3,9	3,3	17,5	20,7	0,7	0,7
16-18	6,4	6,6	0,3	0,3	2,3	2,3	4,0	4,0	0,6	0,9	27,4	39,5	3,9	3,7	20,3	23,8	0,5	1,3
18-20	6,2	6,7	0,3	0,3	2,1	2,3	3,6	3,9	0,6	0,8	30,2	41,2	3,8	3,2	20,0	25,7	0,5	1,4

Elaboración propia



pH

El pH del suelo es ligeramente ácido, los valores menores están en la superficie y a mayor profundidad se acercan a la neutralidad, las variaciones en profundidad son menores en la prequema. En la postquema las variaciones son mayores y el valor de la media de pH aumenta en 0,2. Esto debido a que las cenizas producidas en la quema alcalinizan el suelo al reducir la formación de ácidos orgánicos (Hernández y López, 2002)

Este comportamiento, en mayor o menor grado, ha sido reportado por Vega et al. (2000) y Capulín et al. (2010), todos coinciden en que el pH aumenta con las quemas e incluso el cambio puede ser de más de una unidad. A su vez Celis et al. (2013), encontraron que es debida a la pérdida de los grupos OH de las arcillas, la liberación de cationes o la sustitución de protones en el complejo de cambio pueden ser las razones de estos cambios.

En la zona estudiada el cambio de pH no fue de más de un grado, Vega et al. (2000) indican que la humedad del suelo puede ser un factor que aminore los cambios del suelo, en el suelo estudiado (Gleysol) con sus problemas de

infiltración e hidromorfismo, puede ser el factor por el cual el cambio de pH sea menor que el reportado en otras zonas.

CE

No se encontraron problemas de salinidad al obtener valores menores de uno en la conductividad eléctrica tanto en la prequemada como en la postquemada en todos los sitios y en todas las muestras.

CO y MO

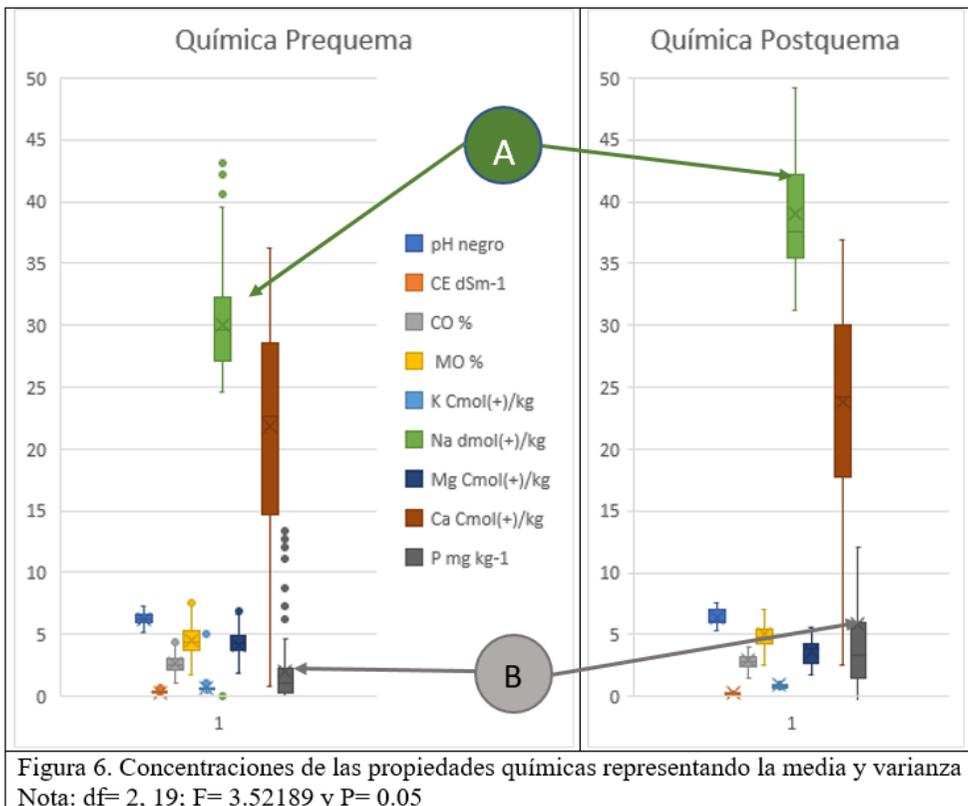
Antes de la quemada se encontraba una gran cantidad de hojarasca sobre el suelo producto de la caída de hojas del cultivo. El contenido de materia orgánica y carbono en los estratos minerales estudiados fue alto (mayor de 2% de CO) y muestran una mayor concentración en superficie disminuyendo con la profundidad. En la postquemada el contenido de MO y CO se incrementó y se observó una mayor variación en la profundidad, se encontraron diferencias significativas en los contenidos de CO solo en los primeros 6 cm de profundidad. Al respecto Úbeda et al (2001) reportan igualmente que el efecto del fuego solo se da en los primeros 10 cm en incendios forestales en la región de Girona, España.

Esto indica que la quemada aportó carbono al suelo y las diferencias en los contenidos de carbono pueden estar asociados al comportamiento observado de la temperatura respecto a la profundidad ya que no se alcanzaron temperaturas mayores de 450°C que es cuando se da la combustión casi total de la materia orgánica (Hepper et al., 2008)

En cuanto a los cationes intercambiables, las concentraciones de sodio, potasio, calcio y magnesio tanto en la pre-quemada como en la pos-quemada son altas, sin embargo, no hay cambios significativos en los contenidos de potasio, calcio y magnesio; solo para sodio los cambios son significativos (Figura 6 letra A).

Llama la atención que el potasio y magnesio no se incrementaron, en la mayoría de los trabajos como los de Sánchez et al. (1991), Rosero y Osorio (2013) y Ebel (2018) señalan un incremento en la concentración de potasio debido a la ceniza que se produce como producto de la combustión en temperaturas por debajo de los 300°C y a la disminución de la capacidad de intercambio catiónico del suelo, a su vez Vega et al. (2000) señalan que los incrementos o decrementos de estos cationes dependen tanto de la temperatura como del tipo de vegetación quemada.

El sodio aumenta su concentración un 20% después de la quemada (Figura 6 letra A), posiblemente debido a la formación de sales complejas que aumentan el contenido de sodio del terreno en los primeros 20 cm, este cambio podría ser producto de la destrucción térmica de feldespatos de Na⁺, que son los menos estables entre los feldespatos de acuerdo con Hepper et al. (2008).



Se observa un incremento sustancial en los contenidos de fósforo (Figuras 5 y 6 Letra B) que van de valores menores de 4 mg kg^{-1} de P (contenido bajo) a más de 10 mg kg^{-1} en la pos-quema (medio a alto) solo en los primeros 10 cm, estos incrementos se deben probablemente al aporte del material orgánico degradado durante la quema y a que las temperaturas no fueron lo suficientemente altas para su volatilización.

Estos resultados concuerdan con lo observado por Coldwell et al. (2002), Maycotte et al. (2002) y Capulín et al. (2010) al analizar el efecto de los incendios forestales en México y Estados Unidos en zonas templadas e indican que es debido a que el fósforo es un elemento estable por no presentar compuestos inorgánicos que puedan ser volatilizados o lixiviados siendo un elemento de baja solubilidad, lo que en ocasiones puede causar deficiencias en la disponibilidad para las plantas por otra parte Úbeda (2001) justifica el incremento de fósforo a que se alcanza una temperatura en la que se mineraliza el fósforo orgánico.

El análisis de correlación entre las dos condiciones revisadas, es decir entre las diferentes profundidades para cada variable en pre-quema y post-quema, permite definir si existe un cambio en la distribución de dicha variable

respecto a la distribución inicial por estratos resultan significativos la inversión en el patrón de distribución vertical del sodio (mayor concentración en la superficie) y el comportamiento del fósforo, el carbono y la materia orgánica que tienen correlaciones superiores a 0.9 y confirman que el incremento de fósforo en la postquema proviene de la materia orgánica (Cuadro 2).

Cuadro 2. Correlación para las variables físicas y químicas del suelo bajo condiciones de pre y post quema

Arena	Limo	Arcilla	pH	CE	CO	MO	K	Na	Mg	Ca	P
0,592	0,254	0,794	0,777	0,633	0,921	0,921	0,528	-0,201	0,850	0,817	0,916

De esta forma, los resultados del análisis de correlación en conjunto con las variaciones en la cantidad de los distintos elementos en las muestras procesadas apuntan a que si bien los cambios en la cantidad de nutrientes no son significativos para la mayoría de las variables medidas, los patrones de distribución de estos materiales cambian de manera significativa al menos para el sodio y el fósforo, como se aprecia en las figuras 5 y 6 (letras A y B).

Globalmente los resultados expuestos, al menos para este tipo de suelo y en las condiciones de karsticidad que se da, muestran que la quema reintegra una parte de los nutrientes de manera inmediata y que el cambio a lo largo de tiempos más prolongados debe ser menor al estimado inicialmente por otros trabajos debido a esta reincorporación. Sin embargo, la rápida mineralización y lixiviación de algunos como el fósforo en especial, podría apuntar a esa deficiencia incremental con el tiempo y a la degradación de las propiedades relacionadas con la fertilidad de dicho suelo.

Conclusion

Contrario a lo señalado en la bibliografía, en este estudio la quema de la caña libera nutrientes al suelo, se encontraron diferencias significativas en el comportamiento vertical (a lo largo del perfil), en la distribución y en la concentración de limos, arcillas, sodio y fósforo.

Las temperaturas alcanzadas menores a 200°C durante la quema afectaron las propiedades físicas en cuanto a la textura (contenidos de limo y arcilla), una mayor estabilidad de agregados, a las propiedades químicas principalmente enfocadas a pequeños cambios de pH y cambios importantes en los contenidos de fósforo y sodio principalmente en los primeros 5 cm del suelo, al menos en el caso del tipo de suelo estudiado, el cultivo específico y las características muy particulares del comportamiento de los suelos en la zona kárstica del sur de Quintana Roo.

El contenido de materia orgánica tiene poco cambio en cuanto a concentración, con la quema no se aporta un incremento de nutrientes para el siguiente ciclo, obligando a los productores a utilizar fertilizantes perdiéndose

además, de todos los beneficios derivados de su incorporación directa al suelo (aumento de la porosidad, disminuir la densidad, favorecer la infiltración, etc.).

Los stocks de carbono del suelo no se ven modificados significativamente contrario a lo que sucede en la parte superficial del suelo en donde la parte vegetativa caída del cultivo se acumula (hojarasca) y la quema de esta genera una gran cantidad de cenizas que influyen en el color de la parte superficial del suelo.

Los resultados que se muestran ponen de manifiesto que una parte de los nutrientes aportados mediante los fertilizantes son reincorporados durante la quema, específicamente el fósforo y el sodio muestran este comportamiento al aumentar considerablemente su concentración en la parte superior del perfil luego de la quema, mismo que con el laboreo posterior y las precipitaciones muy posiblemente se redistribuyan en todo el perfil.

Agradecimientos:

Al Laboratorio de Ecología y Ordenamiento Territorial de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo por el apoyo en la realización de esta investigación

References:

1. Cabrera, J. A., & Zuaznábar, 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.
2. Campo, J. (2012). Efectos de incendios experimentales repetidos en la agregación del suelo y su evolución temporal. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia, España.
3. Capulín, G.J., Mohedano, C.L., & Razo, Z.R. (2010). Cambios en el suelo y vegetación de un bosque de pino afectado por incendio. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 79-87.
4. Capulin, G. J., Suárez, I. A., Rodríguez, L. R., Mateo, S. J. J., Razo, Z. R., & Islas, S. M. (2018). Influencia del fuego en el suelo y las propiedades de la vegetación en dos sitios forestales contrastantes en el centro de México. *Ciencia e investigación agraria*, 45(2), 128-137.
5. Caldwell, T. G., Johnson, D. W., Miller, W. W., & Qualls, R. G. (2002). Forest floor carbon and nitrogen losses due to prescription fire. *Soil Science Society of America Journal*, 66(1), 262-267.
6. Celis, R. D., Jordán, L., A., & Martínez, Z. L. M. (2013). Efectos del fuego en las propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo. En: Bento, G.A., & Vieira, A. (Eds) *Grandes incêndios florestais, erosão*,

- degradação e medidas de recuperação dos solos. Universidad do Minho.
7. CONADESUCA (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar). (2022). 09 Informe Estadístico del sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México, zafras 2012-2013/2021-2022. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural - CONADESUCA.
<https://www.gob.mx/conadesuca/documentos/dieproc-informes-estadisticos-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-en-mexico>
 8. Crovetto, C. (1992). Rastrojos sobre el suelo una introducción a la cero labranza. Editorial Universitaria, Santiago, Chile, 301 p.
 9. Chaves, M., & Bermúdez, A. (2006). Motivos y Razones para Quemar las Plantaciones de Caña de Azúcar en Costa Rica. Políticas para la Agroindustria Azucarera Costarricense. Heredia, Costa Rica, 2006. Memoria 2006. Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), agosto. Tomo I, 248- 253.
 10. Dávalos, E. (2007). La caña de azúcar: ¿una amarga externalidad? *Desarrollo y Sociedad* 59, 117-164.
 11. Domínguez, H. (2016). Estudio de las propiedades físicas y químicas del suelo producidas por la quema controlada de vegetación en el municipio de Cumaribo, departamento del Vichada, 19-21.
 12. Ebel, R. (2018). Effects of Slash-and-Burn-Farming and a Fire-Free Management on a Cambisol in a Traditional Maya Farming System. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 25(2).
 13. Fearnside, P. M. (2000). Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Climatic change*, 46(1), 115-158.
 14. Flores, D., Algara, M., Aguilar, N., Carbajal, N., Aldama, C., Ávila, A., & Álvarez, G. 2016. Influence of sugarcane burning on soil carbon and nitrogen release under drought and evapotranspiration conditions in a Mexican sugarcane supply zone. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(2), 177-189.
 15. Fragoso, P., Pereira, A., Bautista, F., & Zapata, G. (2017). Digital soil map of Quintana Roo, Mexico. *Journal of Maps*, 13(2), 49-456.
 16. Goberna, M., García, C., Insam, H., Hernández, M. T., & Verdú, M. (2012). Burning fire-prone Mediterranean shrublands: immediate changes in soil microbial community structure and ecosystem functions. *Microbial ecology*, 64(1), 242-255.

17. González P.O. (2011). Dinámica de la humedad del suelo. Propiedades físicas y escorrentía en laderas mediterráneas afectadas por incendios forestales. Universitat de València.
18. Hartemink, A. E. (1998). Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea. *Geoderma*, 85(4), 283-306.
19. Hernández, I. & López, D. (2002). Pérdida de nutrimentos por la quema de la vegetación en una sabana de *Trachypogon*. *Revista de Biología Tropical*, 50(3-4), 1013-1019.
20. Hepper, E., Urioste, A., Belmonte, V., & Buschiazzo, D. (2008). Temperaturas de quema y propiedades físicas y químicas de suelos de la región semiárida pampeana central. *Ciencia del suelo*, 26(1), 29-34.
21. INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y Pecuarias). 2012. Características climáticas y edáficas de las zonas de abastecimiento de ingenios cañeros en México. Gobierno Federal, SAGARPA, INIFAP.
22. ISO (Internacional Sugar Organization). (Noviembre 2022) Word Sugar Balance. <https://www.isosugar.org/publications/7/world-sugar-balance>. fecha de consulta 25 de noviembre de 2022.
23. Karlen, D. L., Ditzler, C. A., & Andrews, S. S. (2003). Soil quality: why and how? *Geoderma*, 114 (3-4), 145-156.
24. Kohli, M. M.; Díaz, M.; Castro, M., (eds.) 2003 . Estrategias y Metodologías utilizadas en el Mejoramiento de Trigo. Seminario Internacional, La Estanzuela, Uruguay. CIMMYT-INIA.
25. Sánchez, J. J. M., de las Heras Ibáñez, J., & Sanz, J. M. H. (1991). Impacto ecológico de los incendios forestales. *Al-Basit: Revista de estudios albacetenses*, (29), 105-117.
26. Molina, D. E., Molina, C. H., Molina, C., & Molina, J. (2002). Estudio de Caso Sobre el Manejo Convencional y Agroecológico del Cultivo de la Caña de Azúcar en el Valle del Cauca, Colombia. Reserva Natural El Hatico.
27. Maycotte, C. C., Martínez, A. V., Hernández, J. V., Santos, A. T., & Vera, G. (2002). Radiación fotosintéticamente activa y propiedades fisico-químicas en suelos forestales con y sin incendio. *Madera y Bosques*, 8(2), 39-55.
28. Palma, L.D. J. P., García, S. S., Olán, J. J. O., Narcía, A. T., Espinoza, L. D. C. L., Cruz, J. Z., & Martel, M. A. C. (2002). Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF). *Terra Latinoamericana*, 20(3), 347-358
29. Pineda, M. E. B., & Lizarazo, L. M. (2013). Grupos funcionales de microorganismos en suelos de páramo perturbados por incendios forestales. *Revista de Ciencias*, 17(2), 121-136.

30. Ripoli, T. (2000). Energy potencial of sugar cane biomasa in Brazil. *Scientia Agrícola*, 56 (4).
31. Rosero-Cuesta, J. R., & Osorio, I. O. (2013). Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Estado del arte. *Cuaderno activa*, 5, 59-67.
32. Salgado, S., Nuñez, R., Peña, J., Etchevers, J., Palma, D., & Soto, M. R. (2000). Respuesta de la soca de caña de azúcar a la fertilización NPK. *Agrociencia*, 34 (6), 689-698.
33. Salgado, S., Núñez, R., J Peña, J., Etchevers, J. D., Palma, D. J., & Soto, R. M. (2003). Manejo de la fertilización en el rendimiento, calidad del jugo y actividad de invertasas en caña de azúcar. *Interciencia*, 28(10), 576-580
34. Salgado, S., Palma, D. J., Lagunes, L. D. C., Ortiz, C. F., & Ascencio, J. M. (2005). Bases para generar un programa sustentable de fertilización en un ingenio de Tabasco, México. *Interciencia*, 30(7), 395-403.
35. Soto, B., Benito, E., & Díaz-Fierros, F. (1991). Heat-induced degradation processes in forest soils. *International Journal of Wildland Fire*, 1(3), 147-152. de Tabasco, México.
36. SEMARNAT (Secretaría de medio Ambiente y recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. *Diario Oficial de la Federación*. México
37. Senties, H., Gómez, F., Valdez, A., Silva, H., & Trejo, L. (2014). The Agro-Industrial Sugarcane System in Mexico: Current Status, Challenges and Opportunities. *Journal of Agricultural Science*, 6 (4), 26-54.
38. Siebe, C., Jahn, R. & Stahr, K. (1996). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. *Publicación especial 4*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del suelo, A.C. Chapingo, México.
39. Silva, J. M. N., Carreiras, J. M. B., Rosa, I., & Pereira, J. M. C. (2011). Greenhouse gas emissions from shifting cultivation in the tropics, including uncertainty and sensitivity analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D20).
40. Torres, V. D. L., Quiroz, G. R., & Juscamaita, M. J. (2004). Efecto de una quema controlada sobre la población microbiana en suelos con pasturas en la SAIS Tupac Amaru-Junín, Perú. *Ecología aplicada*, 3(1-2), 139-147.
41. Úbeda, X. (2001). Influencia de la intensidad de quemado sobre algunas propiedades del suelo después de un incendio forestal. *Revista de la sociedad española de la ciencia del suelo*, 8, 41-49.

42. Valdes, L. (2016). Efectos del fuego en algunas características de suelos de pinares, Macurije, Pinar del Río, Cuba. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 12(2), 60-65.
 43. Vega H. J. A. V., Landsberg, J., Bará, S., Paysen, T., & Santos, M. A. (2000). Efectos del fuego prescrito bajo arbolado de *P. pinaster* en suelos forestales de Galicia y Andalucía. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (9), 123-136.
- WRB (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos Actualización 2015. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.