



## EFFECTO DE LA QUEMA AGRÍCOLA EN UN VERTISOL DE TABASCO MÉXICO: FOSFORO, pH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA †

### [EFFECT OF AGRICULTURAL BURNING IN A VERTISOL OF TABASCO, MÉXICO: CHANGES IN PHOSPHORUS, PH AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY]

G. del R. Lázaro Sánchez<sup>1</sup>, F. Bautista<sup>2</sup>, A. Goguitchaichvili<sup>3</sup>,  
U. López-Noverola<sup>1</sup> and R. Sánchez-Hernández<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> *División Académica de Ciencias Agropecuarias, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Villahermosa-Teapa km. 25, Ranchería La huasteca, Centro, Tabasco, México. C.P. 86280. rusaher@hotmail.com*

<sup>2</sup> *Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, Col. Ex-hacienda de San José de la Huerta, Morelia, Michoacán, México. C.P. 58190.*

<sup>3</sup> *Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, col. Ex-hacienda de San José de la Huerta, Morelia, Michoacán, México. C.P. 58190.*

\*Corresponding author

#### SUMMARY

**Background.** The practice of burn in the sugarcane crop is considered necessary to facilitate the harvest, although the possible negative impacts on the soil fertility are questioned. **Objective.** The aim of the present research was to characterize the burn and its effects on phosphorus, pH and electrical conductivity in a Chromic Vertisol Gleyic cultivated with sugarcane. **Methodology.** Thus, in one plot, 10 sampling sites were selected, in each one of them, were placed ceramic pieces marked with a coating thermosensitive, these pieces were deposited at 0, 2 and 5 cm depth. At the same sites, soil samples were collected every two cm to a maximum depth of 20 cm, to detect changes in soil variables before and after burning. At the same time, the temperature produced by the burning of the combustible material was measured at three sites of the reedbed, using an infrared thermometer. **Results.** The results indicated that, the burning of the fuel material of the sugarcane produces between 372-549 °C of heat, at the soil surface it reaches 473°C, and less than 149 ° C in the layer 0-20 cm deep. **Implication.** The impact that this burning causes is a slight decrease in pH and a slight increase in EC in the layer of 0-20 cm depth, as well as a minimal increase in the available P in the first 12 cm of the soil surface. **Conclusion.** It is concluded that, the wastes burn in the sugarcane crop is of moderate intensity, so that provoke light changes in the edaphic variables EC, pH and available P.

**Key words:** burning agricultural waste; *Saccharum officinarum* L.; Vertisols; edaphic fertility.

#### RESUMEN

**Antecedentes.** La quema en el cultivo de la caña de azúcar es una práctica cultural que se considera necesaria para facilitar la cosecha, aunque se cuestionan los posibles impactos negativos sobre la fertilidad del suelo y el medio ambiente. **Objetivo.** La presente investigación tuvo como objetivo, caracterizar los efectos de la quema del cultivo de caña de azúcar, sobre el fósforo disponible (P), pH y conductividad eléctrica (CE) en un Chromic Vertisols Gleyic. **Metodología.** Para ello, en una parcela cultivada con caña de azúcar, se seleccionaron 10 sitios de muestreos, en cada uno de ellos se colocaron piezas de cerámica marcadas con revestimientos termosensibles, dichas piezas se colocaron a 0, 2 y 5 cm de profundidad. En los mismos sitios, se colectaron muestras de suelo cada dos cm hasta una profundidad máxima de 20 cm, para detectar cambios en las variables edáficas antes y después de la quema. Paralelamente, en tres sitios del cañaveral se midió la temperatura que produce la quema del material combustible, mediante un termómetro de infrarrojo. **Resultados.** Los resultados indican que, la quema del material combustible de la caña, produce entre 372-549° C de calor, arriba de la superficie del suelo se alcanzan 473° C, y menos de 149° C en el interior del suelo. **Implicaciones.** El impacto que esta quema provoca es un ligero descenso del pH y aumento de la CE en la capa de 0-20 de profundidad, así como un mínimo aumento del P disponible en los primeros 12 cm de la superficie.

† Submitted June 30, 2020 – Accepted November 6, 2020. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.  
ISSN: 1870-0462.

**Conclusiones.** Se concluye que, la quema de residuos en la caña de azúcar es de intensidad moderada, por lo que causa cambios ligeros en las variables edáficas CE, pH y P disponible.

**Palabras claves:** Combustión de residuos agrícolas; *Saccharum officinarum* L.; Vertisols, fertilidad edáfica.

## INTRODUCCIÓN

La quema en el cultivo de la caña de azúcar es una práctica agronómica, que se ha generalizado en los países productores en todo el mundo, dado que, eficientiza las labores de corte y recolección de los tallos (Dávalos, 2007). Sin embargo, la quema agrícola en general se ha asociado a diversos problemas ambientales, económicos, técnicos y sociales (Toledo *et al.*, 2005; Wiedenfield, 2009; França *et al.*, 2012). De acuerdo con Kambis y Levine (1996), la quema ocasiona la liberación de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero a la atmósfera. Acelera procesos fisicoquímicos y biológicos en los ecosistemas, así como de los horizontes orgánicos de la capa superficial del suelo, lo que significa una reducción severa de la hojarasca, que es la reserva activa más grande de nutrimentos en los ecosistemas. Después de la quema, se afectan muchas interacciones reguladas por los microorganismos, por lo que se modifican tanto el ciclaje, como la evolución de la materia orgánica del suelo (MOS). Otros efectos es la esterilización directa en la superficie, la transformación de minerales, liberación de CO<sub>2</sub>, degradación de la MOS, afectación a la estructura del suelo, así como también a la microflora del suelo, lo que provoca cambios en las propiedades edáficas. Sin embargo, se ha reconocido el efecto fertilizante del fuego desde los inicios de la agricultura, que permite la liberación de nutrientes que quedan en las cenizas, los cuales se incorporan de manera casi inmediata, a las reservas del suelo y de la microfauna sobreviviente (Pyne, 2001). La quema acidifica y disminuye la fertilidad de los suelos, lo que provoca la volatilización y lixiviación de nutrientes, lo que repercute en una menor producción, y obliga a los productores a recurrir a un mayor uso de fertilizantes químicos, incrementa los costos de producción y causan impactos al medio ambiente (Norgrove y Hauser, 2015). Según Mérimo *et al.* (2019), el fuego ayuda a incrementar el contenido de P, debido a los efectos que provoca sobre la mineralización del P que se contienen en la MOS, aunque advierten, que estos cambios dependen de la intensidad de la quema, dado que el proceso de mineralización crece linealmente con la temperatura que se alcanza durante una combustión. Por lo anterior, los cambios que el fuego provoca a las propiedades del suelo no se pueden generalizar, ya que dependen de las características de intensidad y duración de las quemaduras. Algunas propiedades como el carbono orgánico, pH y la actividad de la fosfatasa se incrementan conforme la severidad de la quema, mientras que otros indicadores de calidad del suelo como la relación C/N, y el C de la biomasa microbiana,

solo cambian cuando la severidad de la quema es extremadamente alta (Vega *et al.* (2013). Después de una quema, el efecto inmediato que ocurre en el suelo es la deposición de cenizas, las cuales se constituyen de una mezcla de componentes inorgánicos, principalmente nutrientes disponibles en forma de aniones y cationes, los cuales modifican el pH y la CE. Después de una quema, la variación que experimenta el pH y la CE, se debe a la pérdida de grupos funcionales OH<sup>-</sup>, a la oxidación completa de los residuos orgánicos y a la liberación de cationes (Delač, *et al.*, 2020). Sin embargo, cuando el suelo queda expuesto a temperaturas de alrededor de 500° C, la CE puede disminuir, debido a la destrucción de minerales de la arcilla, la formación de óxidos y la formación de partículas de cuarzo (Terefe *et al.*, 2008).

El uso del fuego en la agricultura constituye un agente de cambio ambiental, con impactos tanto locales como globales, que ejerce una fuerte influencia en los procesos de los ecosistemas (Roy *et al.*, 2005). Sin embargo, los efectos no se pueden generalizar debido que una quema es variable tanto en su duración como en su intensidad, la conjunción de ambos factores constituye la severidad, y de esta depende los cambios que se registren en el suelo. Otro factor que debe tomarse en cuenta en la evaluación de los cambios que provoca la quema en el suelo, es la profundidad que se afecta durante el incendio. Ice *et al.* (2004) y Certini (2005), señalan que en caso de que la quema llegue a los 900° C en la superficie, rara vez excede los 150° C a 5 cm de profundidad del suelo. La quema de la caña de azúcar es una práctica que ha sido objeto de aceptación y rechazo, sin embargo, tanto la evaluación de su severidad, como sus impactos al suelo aun no tienen antecedentes suficientes en México, por lo que se requiere sentar las bases científicas y técnicas que permitan el diseño de planes de manejo sustentables en este cultivo. Con base en la magnitud de los efectos acumulados de la quema sobre una comunidad ecológica, Baloloy *et al.* (2016) clasificó la severidad de la quema de la caña de azúcar en siete clases, e indicaron que, la quema en este cultivo, en su mayoría son de baja a moderada severidad, por lo que hipotéticamente, en esta investigación no se esperan cambios drásticos en los niveles de fertilidad del suelo. Sin embargo, de acuerdo con Vega *et al.* (2013); Estrada-Herrera *et al.* (2017) y Delač, *et al.* (2020), es posible registrar cambios a través de la inclusión de variables sensibles a quemaduras de baja severidad, asequibles que definan con mayor precisión el estado actual de la fertilidad de los suelos y evidencien su degradación. Por lo anterior, el objetivo de la

investigación es caracterizar los efectos de la quema, sobre el fósforo disponible (P), pH y conductividad eléctrica (CE) en un Chromic Vertisol Gleyic cultivado con caña de azúcar en Tabasco, México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del área de estudio

El sitio experimental se ubicó en el poblado C-11, General José María Morales y Pavón, perteneciente al municipio de Cárdenas, Tabasco, México (17° 59' N; 93° 33' O). La precipitación promedio anual es de 2 163 mm y una temperatura media anual de 26.5° C, por lo que de acuerdo al sistema de Köppen modificada por García (2004), el clima se clasifica como cálido húmedo con lluvias en verano (Am (f)). El suelo fue clasificado de acuerdo a la WRB 2015 como un Chromic Vertisol Gleyic.

### Descripción de la quema agrícola

Para determinar la temperatura específica que se alcanza durante la quema de la caña de azúcar, sobre y dentro de la superficie del suelo, en una parcela de 10 hectáreas se seleccionaron 10 sitios de muestreo. La selección y distribución de los sitios de muestreo fueron a criterio del investigador para lograr una cobertura completa y homogénea en la totalidad de la parcela. En cada sitio, se colocaron piezas cerámicas a diferentes profundidades del suelo, a 0 (sobre la superficie), 2 y 5 cm. Sobre estas piezas se pintaron bandas de colores con un revestimiento indicador de la marca Tempilaq®. De acuerdo con Chandler *et al.* (1983), las quemaduras ligeras registran temperaturas mayores a 250° C en la superficie y más de 100° C a una profundidad entre 1-2 cm; las quemaduras moderadas entre 300-400° C en la superficie, y de 200-300° C a 1 cm de profundidad; y las quemaduras severas entre 500-750° C en la superficie y más de 300° C a 3 cm de profundidad. Con base en la clasificación anterior, los indicadores que se colocaron en la superficie, son sensibles a 343, 399, 454 y 550° C; y los colocados a 2 y 5 cm de profundidad, son sensibles a 149, 191, 260 y 302° C. Paralelamente a estas mediciones, se seleccionaron cuatro sitios de la misma parcela, en los que, durante el evento de la quema, se midió la temperatura máxima que se alcanzó durante la combustión de la biomasa seca. Para ello, en cada sitio se tomaron lecturas de temperatura cada 20 segundos, hasta consumirse el fuego en su totalidad, para ello se utilizó un termómetro infrarrojo de la marca AMPROBE® modelo IR-750 50:1.

### Evaluación de cambios edáficos provocados por la quema

Un día antes de realizar la quema, en los mismos sitios donde se colocaron las piezas cerámicas, se tomaron muestras de suelo cada 2 cm hasta una profundidad máxima de 20 cm. Inmediatamente después de la quema, se muestrearon los mismos sitios a las mismas profundidades, por lo que se obtuvieron 200 muestras divididas en dos series, 100 antes y 100 después de la quema. Las muestras se tomaron con herramientas de plástico, se secaron, trituraron y tamizaron. En las muestras se practicaron análisis químicos para determinar las variables pH, conductividad eléctrica (CE) y fósforo asimilable (P). El pH se determinó por potenciometría en una pasta suelo: agua relación 1:2; a través de un equipo electrónico modelo HI2210 de la marca Hanna Instrument® (Thomas, 1996). La CE fue determinada en una pasta de suelo: agua, relación 1:5; por conductimetría automatizada con puente de Wheatstone (Richards, 1954). El fósforo asimilable (P), se cuantificó por el método de Olsen, utilizando un espectrofotómetro de la marca GENESYS 10 UV® (Bremner, 1996).

### Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento para medir las variables edáficas se diseñó como un completamente al azar con un arreglo factorial 2\*10, que corresponden a dos tratamientos: antes de la quema (AQ) y después de la quema (DQ), y 10 niveles, que corresponden a las 10 profundidades. Los datos se analizaron mediante ANOVA de una y dos vías, y pruebas de comparaciones de medias de tukey ( $p \leq 0.5$ ). Los datos obtenidos a partir de las piezas de cerámica y del termómetro de infrarrojo para caracterizar la quema, dentro y fuera de la superficie del suelo, se analizaron mediante estadística descriptiva.

## RESULTADOS

### Descripción de la quema

Con base en los resultados obtenidos a través del termómetro de infrarrojo, se observa que la quema de la caña de azúcar es un evento que ocurre rápidamente, en un metro cuadrado el material combustible se consume en menos de un minuto. A los 20 segundos de haber iniciado la quema se alcanza una temperatura de 372° C, a los 40 segundos se alcanzan 500° C, y a los 60 segundos se alcanzan una temperatura máxima de 549° C. En promedio la quema alcanza una temperatura de 473° C (Figura 1). De acuerdo con la clasificación de Chandler *et al.* (1983), la quema de caña de azúcar se puede considerar como moderadas, ya que, aunque supera los 300-400° C en la superficie,

la duración es muy breve, y no alcanzan el límite de los 200-300° C a 1 cm de profundidad del suelo, tal a como lo establecen los criterios de clasificación.

Los resultados obtenidos a través de las piezas de cerámica, indicaron que la temperatura en la superficie del suelo fue mayor a 550° C, sin embargo, a partir de los 2 cm de profundidad, la temperatura solo alcanzó los 149° C. Se puede considerar, que la quema agrícola en la caña de azúcar, es rápida y que puede llegar a alcanzar una temperatura superior a los 473° C sobre la superficie del suelo, la cual se difunde como calor, alcanzando una menor temperatura conforme se incrementa la profundidad.

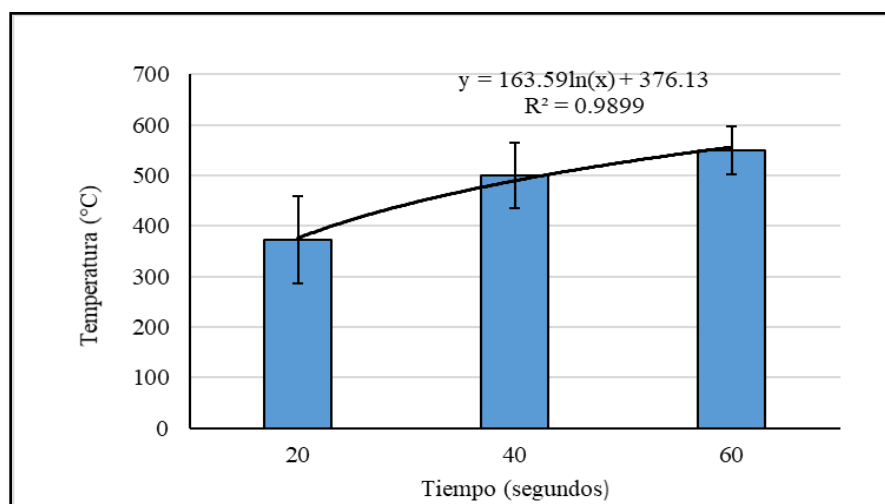
### Cambios en las propiedades edáficas.

Al analizar los datos mediante un ANOVA de una vía, en donde la variable independiente es la quema, se observaron diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ) AQ y DQ, tanto en las variables pH como en CE, mientras que en la variable P disponible, no se registraron diferencias estadísticas significativas. Sin embargo, al analizar el efecto de la interacción de las variables independientes quema\*profundidad a través de un ANOVA de dos vías, el pH, CE y P registraron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) (Cuadro 1).

Como se puede observar, en las variables CE y pH se observan diferencias entre tratamientos, se observa que después de la quema, el pH disminuye y la CE se incrementa. Sin embargo, en ambas variables no se observan diferencias estadísticas en el factor profundidad, tanto AQ, como DQ.

En la variable fósforo asimilable (P), el valor de la probabilidad de la interacción entre tratamientos\*profundidad presenta alta significancia, lo que refleja que los tratamientos (AQ vs DQ) registran un efecto que depende de la profundidad. Es por ello que, la concentración de P es mayor en el tratamiento DQ en la capa de suelo entre 0-12 cm de profundidad, con respecto a la capa más profunda de 12-20 cm.

En la figura 2, se puede observar que, antes de la quema, el pH del suelo oscilaba entre 5.8-6.7 que lo ubica entre ligeramente ácido y neutro, sin embargo, no se observaron diferencias estadísticas en los 20 cm de profundidad. Al comparar el pH del suelo AQ y DQ, se observó una disminución que lo ubicó en un rango entre 5.7-6.3, que lo sigue manteniendo dentro de la misma categoría de ligeramente ácido. Aunque en ambas condiciones, no se distinguen diferencias estadísticas significativas, cuando se comparan las medias entre los 10 intervalos de profundidad que se muestrearon. En ambas condiciones se observan un patrón de acidez según la profundidad, que deja ver que el valor del pH es ligeramente más bajo a partir de la superficie hasta una profundidad de 12 cm, a partir de esa profundidad, el pH se torna más neutro, particularmente en la condición antes de la quema. Cuando se compara el pH de ambas condiciones, es claro que, en todas las profundidades evaluadas, la quema provocó un efecto acidificante, aunque las diferencias estadísticas significativas entre ambas condiciones, solo se observan desde la superficie hasta una profundidad de 12 cm.



**Figura 1.** Umbrales de temperaturas alcanzadas en tres tiempos de la duración de la quema de la caña de azúcar.

**Tabla 1. Pruebas ANOVA de una vía para dos tratamientos AQ y DQ entre profundidades, y prueba ANOVA de dos vías de tratamientos con distintas profundidades denominado “profundidad y tratamientos” para parámetros químicos; pH, CE y P. (Medias± Desviación estándar).**

| Profundidad (cm) | pH (1:2)    |             | CE (dS m <sup>-1</sup> ) |             | P (mg kg <sup>-1</sup> ) |               |
|------------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------|--------------------------|---------------|
|                  | AQ          | DQ          | AQ                       | DQ          | AQ                       | DQ            |
| 0-2              | 5.96±0.21   | 5.81±0.37   | 0.10±0.02                | 0.18±0.03   | 12.76±4.41               | 18.96±4.0 a ▼ |
| 2-4              | 6.06±0.14   | 5.79±0.28   | 0.10±0.02                | 0.14±0.05   | 12.96±4.28               | 15.13±3.5 a   |
| 4-6              | 6.09±0.22   | 5.83±0.26   | 0.09±0.02                | 0.14±0.05   | 13.40±5.15               | 14.93±2.9 a   |
| 6-8              | 6.23±0.25   | 5.81±0.29   | 0.09±0.02                | 0.13±0.05   | 11.54±4.48               | 13.59±4.1 a   |
| 8-10             | 5.89±0.48   | 5.81±0.28   | 0.09±0.02                | 0.15±0.05   | 14.23±3.53               | 13.19±3.5 a   |
| 10-12            | 6.19±0.25   | 5.87±0.28   | 0.09±0.02                | 0.13±0.04   | 9.53±3.90                | 12.81±2.1 a   |
| 12-14            | 6.00±0.47   | 5.86±0.21   | 0.08±0.03                | 0.14±0.05   | 12.11±4.30               | 8.57±2.4 b    |
| 14-16            | 5.97±0.48   | 5.93±0.21   | 0.09±0.02                | 0.13±0.04   | 10.77±2.98               | 8.37±2.4 b    |
| 16-18            | 6.07±0.51   | 5.97±0.26   | 0.08±0.03                | 0.14±0.05   | 10.00±3.76               | 7.01±2.2 b    |
| 18-20            | 6.17±0.51   | 6.03±0.24   | 0.08±0.03                | 0.13±0.05   | 8.14±3.60                | 5.39±1.7 b    |
| Media ►          | 6.06±0.35 a | 5.87±0.27 b | 0.09±0.02 b              | 0.14±0.05 a | 11.54±4.04 a             | 11.79±2.88 a  |

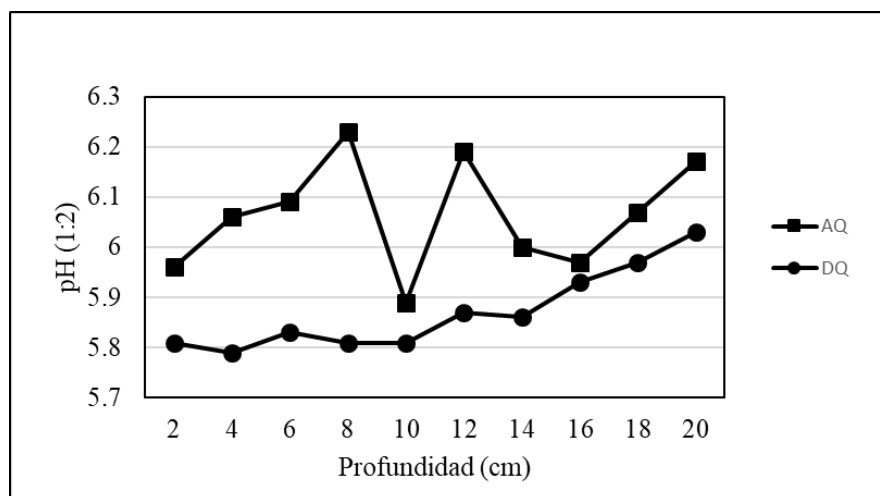
  

| Variables edáficas | Nivel de probabilidad (p≤0.5) |                          |
|--------------------|-------------------------------|--------------------------|
|                    | Tratamientos                  | Profundidad*tratamientos |
| pH                 | 0.00058 ***                   | 0.1162981                |
| CE                 | 4.34e-15 ***                  | 0.03439*                 |
| P                  | 0.75                          | 1.042e-15 ***            |

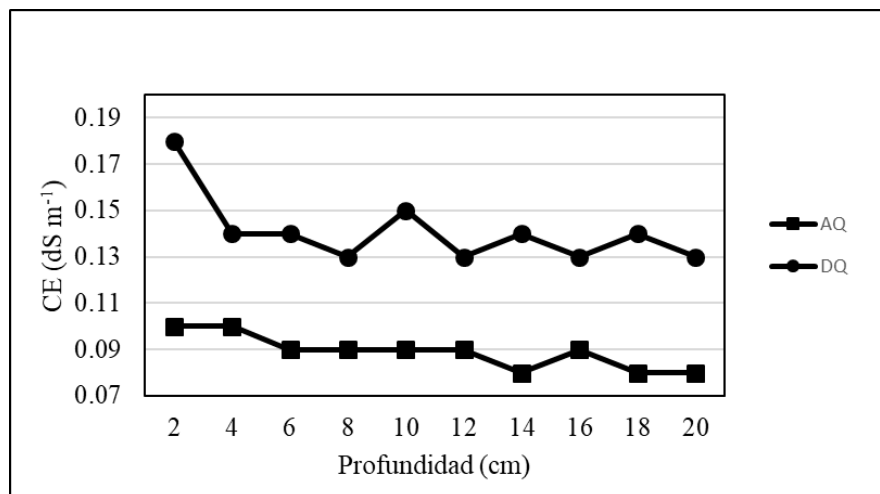
Abreviaturas: AQ (Antes de la quema), DQ (Después de la quema), ► (Comparación de medias entre tratamientos), ▼ (Comparación de medias entre profundidades). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas, en las variables que registraron diferencias estadísticas.

Se observa que la quema agrícola en el suelo cañero provocó un aumento en la conductividad eléctrica (CE), ya que AQ, el rango de la CE se ubicaba entre 0.7-1.2 dS m<sup>-1</sup>, valor que se incrementó a 0.8-1.9 dS m<sup>-1</sup> DQ (figura 3). Al comparar las medianas de la CE entre las diferentes profundidades bajo una misma condición, no se observan diferencias estadísticas bajo ambos tratamientos (AQ, DQ). Al comparar las

medianas de la variable CE entre las dos condiciones de quema, se observan diferencias estadísticas entre AQ y DQ. El análisis de la interacción de las variables independientes, condición de la quema y la profundidad, develan un gradiente de disminución de la CE que va desde la superficie hacia la mayor profundidad, una tendencia que no es clara en los suelos antes de la quema.



**Figura 2.** Cambios en los niveles de pH según la profundidad del suelo, por efecto de la quema de la caña de azúcar.



**Figura 3.** Cambios en la CE según la profundidad del suelo, por efecto de la quema de la caña de azúcar.

AQ, los niveles de P en el suelo no se diferenciaron estadísticamente. Sin embargo, en el tratamiento DQ, las profundidades más someras entre 0-12 cm, se diferenciaron estadísticamente de las profundidades 12-20 cm. Al analizar la interacción de la condición de quema y profundidad, se puede observar que la mayor concentración de P disponible está cercana a la superficie, situación que es relevante, debido a que, a pesar que en la superficie es en donde la quema incrementa mayormente la temperatura, y en donde ocurren los cambios en pH y CE, estos parecen no afectar el posible suministro de P al cultivo de la caña de azúcar (figura 4). En los tratamientos AQ y DQ, se observa que, a niveles cercanos a la superficie, hay una mayor concentración de P con respecto a las profundidades mayores. Esto indica que, en términos de concentración de P, el tratamiento de quema influye en los niveles de concentración del mismo, solo en los primeros 12 cm de profundidad. AQ los rangos de P se encontraban entre 1.5-18.5 mg kg<sup>-1</sup>, DQ fueron de 2.7-20 mg kg<sup>-1</sup>, ese ligero incremento de P que se observa es atribuible a un efecto de la quema.

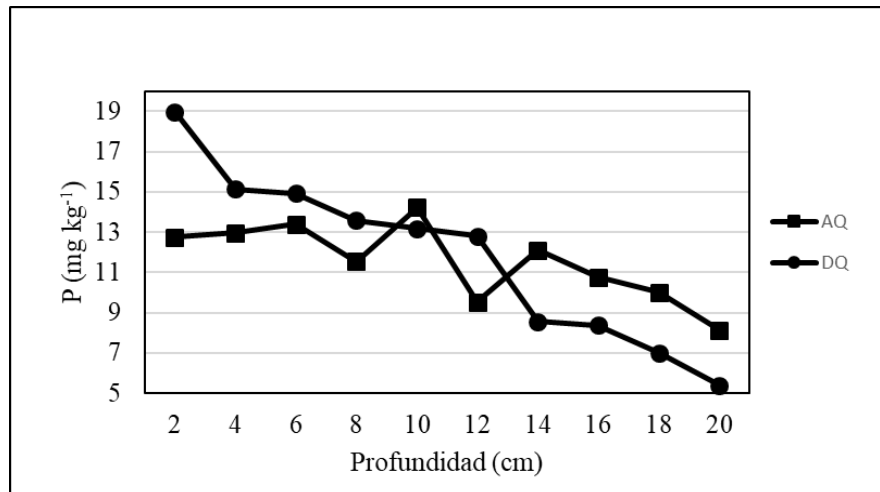
El análisis de la interacción entre la condición de quema\*profundidad registra un valor de  $p=1.049^{-06}$  \*\*\*, una diferencia altamente significativa que es mayormente influenciada por el efecto de la profundidad, es por ello que, en ambas condiciones de quema, se observa un gradiente de concentración de P, en donde la mayor concentración va desde la superficie hasta la mayor profundidad, aunque en los primeros 4 cm de los suelos DQ presentaron una mayor mediana, con respecto a los suelos AQ. Con excepción de los primeros 4 cm de profundidad, en la mayoría de los casos, el P es ligeramente mayor en los suelos AQ, aunque estadísticamente significativos, solamente el tratamiento de del suelo DQ a la profundidad entre 0-

12 cm fue mayor con respecto a las profundidades 12-20 cm.

De acuerdo a los análisis de correlación, las variables estudiadas muestran que el grado de asociación entre las variables son débiles, muchas de las cuales se mantienen en el mismo nivel AQ y DQ, por ejemplo, la correlación que existe entre el pH y la CE. Caso contrario se observa entre la correlación que existe entre el pH y el P, donde se observa que de presentar una correlación débil de  $r=0.33$  AQ, pasa a presentar una correlación con valor de  $r=0.06$  DQ que se puede considerar como nula. Por su parte, la correlación entre CE vs P presentó una  $r=0.09$  AQ, que pasó a una  $r=0.32$  DQ.

## DISCUSIÓN

Los cambios que el fuego provoca al Chromic Vertisol Gleyic, dependen de factores como la duración e intensidad de la quema (Neary *et al.*, 1999; Certini, 2005). Según Neary *et al.* (1999), las quemaduras ligeras alcanzan los 250° C en la superficie del suelo, 100° C a 2.5 cm de profundidad y 50° C a 5 cm de profundidad; las moderadas llegan a 400° C en la superficie, 175° C a 2.5 cm de profundidad y 50° C a 5 cm de profundidad, y las de alta intensidad superan los 675° C en la superficie, 190° C a 2.5 cm de profundidad y 75° C a 5 cm de profundidad. Los resultados de nuestra investigación, ubican a la quema de la caña de azúcar como rápida (menos de un minuto), y de intensidad moderada, que puede superar los 473° C sobre la superficie del suelo, con bajo incremento térmico al interior del perfil del suelo. Por la velocidad con la que ocurren este tipo de quemaduras, los cambios que se producen sobre las propiedades edáficas, solo afectarían los primeros 2 cm de profundidad (Neary *et al.*, 1999; Certini, 2005).



**Figura 4.** Cambios en los niveles de P según la profundidad del suelo, por efecto de la quema de la caña de azúcar.

Uno de los cambios que se producen en el suelo como consecuencia de la quema, es la adición de ceniza, las cuales significan el aporte de elementos químicos nutrientes (Khanna *et al.*, 1994), este aporte de cenizas significa el ingreso de cationes al suelo, que en la mayoría de los casos mejoran la fertilidad, aunque dependiendo del tipo de composición química de las cenizas, se pueden presentar algunos antagonismos con otros nutrientes. Al incrementarse el contenido de sales solubles provenientes de las cenizas, se registra un aumento de la CE del suelo, en algunos casos estos cambios en la CE son efímeros, ya que las sales son rápidamente lixiviadas o transportadas por las escorrentías (Zavala *et al.*, 2014). La cantidad y propiedades de las cenizas que se incorporan al suelo, depende de las especies que se combustionan, cantidad y contenido de humedad del material combustible, temperatura máxima que se alcanza durante la quema y tiempo que permanece caliente el suelo (Pereira *et al.* 2017; Úbeda, 2009). Sin embargo, en esta investigación, la adición de cenizas en la superficie, no representa la única causa de la variación de la CE, ya que, como se puede observar en la figura 3, el incremento de la CE no solo se registra cercano a la superficie, sino que se observa en los 20 cm de profundidad, lo que indica que, este efecto probablemente no se debe solo a la adición de cenizas, sino que el incremento de temperaturas en el suelo genera transformaciones químicas, que pueden estar acelerando procesos de mineralización de elementos contenidos en la materia orgánica, o que se encuentran en la fracción mineral del suelo.

Otro factor a considerar es que, durante la quema el calor que se genera incrementa la evaporación de la humedad, lo que aumenta la concentración de iones en la solución y consecuentemente un aumento en la CE

(Pedrera-Parrilla *et al.*, 2016). Asimismo, si la combustión no rebasa los 200° C, una cantidad considerable de componentes orgánicos del suelo sufren pirolisis parcial, que provoca un aumento en la concentración de N mineral y de C orgánico (Zavala *et al.* 2014), por lo que esa adición, en algunos casos significa un aumento en la capacidad de intercambio catiónico, la cual correlaciona positivamente con la CE (Grubbs *et al.* 2019). Otros factores con los que correlaciona la CE son la conductividad hidráulica y con el pH, debido principalmente al efecto que provoca la solubilidad de los componentes iónicos presentes (Rezaei *et al.*, 2016).

Asimismo, en la investigación se puede observar, una modificación del pH por efecto del fuego, específicamente se observa una disminución en todas las profundidades después de realizada la quema, aunque esta acidificación es muy ligera, por lo que se mantiene el suelo en el mismo rango de acidez, cercanos a la neutralidad, por lo que no representan un factor adverso para la disponibilidad de nutrimentos.

Granged *et al.* (2011) señalan que la quema provoca la destrucción de ácidos orgánicos, y las cenizas que se generan aportan carbonatos, bases y óxidos, lo que se refleja en una disminución del pH. Sin embargo, los efectos del fuego sobre las variaciones del pH no se pueden generalizar, ya que dependen de la intensidad de la quema, así como de la capacidad buffer del suelo, misma que está regulada por los componentes orgánicos y minerales de los suelos (Pereira *et al.* 2013).

Certini (2005) señala que después de una quema de alta intensidad, el pH se incrementa significativamente, debido a la reducción de la materia orgánica y a la

perdida de grupos  $\text{OH}^-$  de los minerales de las arcillas, así como por la formación de óxidos, liberación de cationes o sustitución de protones en el complejo de intercambio, en esos casos, si la quema incrementa el pH, este cambio resulta benéfico, ya que el mayor pico de disponibilidad de P en el suelo ocurre con un pH de 6.5, aunque con frecuencia esta disponibilidad declina rápidamente (Certini, 2005). Sin embargo, los resultados obtenidos en la investigación soportan la hipótesis de que las quemaduras en la caña de azúcar no son de alta intensidad, por lo que contrario a un incremento del pH, se observa la disminución de esta variable en el tratamiento DQ.

Cuando la quema supera los  $200^\circ\text{C}$ , el suelo experimenta una pérdida de materia orgánica, ya que, dependiendo de la duración del evento, ocurre una ligera destilación donde se pierden algunos constituyentes menores por volatilización, calcinación o una oxidación completa (Giovannini *et al.* 1988), en el caso de esta investigación, la quema no provocó incrementos de temperaturas mayores a  $149^\circ\text{C}$  dentro del perfil del suelo, lo que supone una quema de bajo impacto a los contenidos de P, ya que este elemento a diferencia del N, no se pierde por volatilización o lixiviación de manera importante.

Las correlaciones que se observan en la investigación demuestran que, bajo las condiciones edáficas del experimento, las variables pH, CE y P operan de manera independiente, salvo algunos cambios ligeros que produce el efecto de la quema.

De acuerdo con Penn *et al.* (2019) la máxima disponibilidad de P se logra cuando el pH se ubica entre 6.5-7.0, sin embargo, esta regla puede presentar algunas excepciones debido a un cambio entre varios mecanismos de sorción de P, que se ven afectados de diferentes maneras por el pH, en parte determinados por las propiedades del suelo, por lo que es incorrecto suponer que la interacción entre el pH y el P ocurre solo por un mecanismo. Si se toma en cuenta que el pH del suelo en la investigación AQ era de 5.75-6.5 y que DQ fue de 5.55-6.25, aun cuando significa una ligera acidificación del suelo, esta no representa una variación significativa como para afectar negativamente la disponibilidad de P, además de que el nivel de pH se sigue manteniendo en rangos que no afectan a la variable P.

La correlación entre P vs CE AQ era nula, sin embargo, DQ se observa una débil correlación ( $r=0.32$ ,  $p=0.007$ ), lo que puede representar un indicio de que la quema pone disponible el P, particularmente en la capa más somera del suelo (0-12 cm de profundidad), lo que puede explicar el ligero incremento en la CE que se observa después de la quema (Fernández-García *et*

*al.*, 2019). Este incremento de P en la parte más superficial del suelo, advierte del efecto del fuego sobre el suministro del mismo, el cual según algunos autores señalan que, durante la quema ocurren deposiciones de cenizas o material orgánico carbonizado y parcialmente quemado, que puede liberar P, asimismo el fuego también puede liberar P de otros pools orgánicos del suelo a través de la combustión y/o mejorar la mineralización de la materia orgánica del suelo (Ketterings *et al.*, 2002).

## CONCLUSIÓN

La quema de la caña de azúcar que se practica en suelos Vertisols de Tabasco, se pueden catalogar como rápidas y de intensidad moderada. Durante el evento de la quema, se alcanzan temperaturas entre  $372$  y  $549^\circ\text{C}$  sobre la superficie del suelo; mientras que, al interior del perfil, solamente a 2 cm de profundidad se registran incrementos de temperaturas que no superan los  $149^\circ\text{C}$ . El efecto de esta quema agrícola en la caña de azúcar provoca cambios en los suelos, en el caso del Chromic Vertisol Gleyic estudiado, se registró el efecto de una ligera disminución del pH e incrementos de la CE hasta una profundidad de 20 cm, mientras que dicha quema solo incrementó los niveles de P hasta los 12 cm de profundidad.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Ing. Dolores Sánchez Hernández por las facilidades para el acceso a la parcela, y por el apoyo técnico en las fases de campo y laboratorio en el estudio.

**Financiamiento.** Los autores agradecen el apoyo financiero al proyecto CONACYT: 283135, las propiedades magnéticas de los suelos y sus aplicaciones: contaminación, clasificación y uso del fuego en agricultura.

**Conflictos de interés.** Todos los autores declaran que no hay conflicto de intereses relacionados con esta publicación.

**Cumplimiento de estándares de ética.** La investigación fue realizada y presentada por los autores bajo principios éticos y responsabilidad científica en el manejo de los datos.

**Disponibilidad de datos.** El autor de correspondencia podrá proporcionar la información o datos necesarios con previa solicitud.

## REFERENCIAS

Bremner, J. M. 1996. Nitrogen-total. In: Sparks DL (ed) Methods of soil analysis—part 3—



- chemical methods. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, pp 1085–1121
- Baloloy, A.B., Blanco, A.C., Gana, B.S., Sta Ana, R.C., Olalia, L.C. 2016. Landsat-based detection and severity analysis of burned sugarcane plots in tarlac, philippines using differenced normalized burn ratio (dNBR). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42:173–179. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W1-173-2016>.
- Cerón, R. L.E. and Aristizábal, G. F. A. 2012. Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14: 285-295.
- Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143: 1-10.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., Williams, D. 1983. *Fire in Forestry*, vol. I, Forest Fire Behavior and Effects. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Dávalos, Á. E. 2007. La caña de azúcar: ¿una amarga externalidad? *Revista Desarrollo y Sociedad* 59: 117-164.
- Delač, D., Kisić, I. and Pereira, P. 2020. Dynamics of runoff pH and electrical conductivity after pile burns. 55th Croatian & 15th International Symposium on Agriculture, February 16-21, 2020, Vodice, Croatia. [https://bib.irb.hr/datoteka/1051273.Zbornik\\_radova\\_2020\\_web.pdf#page=45](https://bib.irb.hr/datoteka/1051273.Zbornik_radova_2020_web.pdf#page=45)
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H. and Etchevers-Barra, J. D. 2017. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51: 813-831.
- Fernández-García, V., Miesel, J., Baeza, M. J., Marcos, E. and Calvo, L. 2019. Wildfire effects on soil properties in fire-prone pine ecosystems: Indicators of burn severity legacy over the medium term after fire. *Applied Soil Ecology*, 135: 147-156.
- Franca, V. V., Vieira, D. and Capelle, K. 2012. Simple parameterization for the ground-state energy of the infinite Hubbard chain incorporating Mott physics, spin-dependent phenomena and spatial inhomogeneity. *New Journal of Physics*, 14: 073021.
- García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM. Serie Libros, No. 6. México, D. F. 90 p.
- Giovannini, G., Lucchesi, S. and Giachetti, M. 1988. Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Science*, 146: 255-261.
- Granged, A. J., Zavala, L. M., Jordán, A. and 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: 85-94.
- Grubbs, R. A., Straw, C. M., Bowling, W. J., Radcliffe, D. E., Taylor, Z. and Henry, G. M. 2019. Predicting spatial structure of soil physical and chemical properties of golf course fairways using an apparent electrical conductivity sensor. *Precision Agriculture*, 20: 496-519.
- Ice, G. G., Neary, D. G. and Adams, P. W. 2004. Effects of wildfire on soils and watershed processes. *Journal of Forestry*, 102: 16-20.
- Kambis, A.D., and J. S. Levine. 1996. Biomass burning and the production of carbon dioxide: A numerical study, in *Biomass Burning and the Global Change*, edited by J. S. Levine, pp. 170-179, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Ketterings, Q.M., van Noordwijk, M. and Bigham, J. M. 2002. Soil phosphorus availability after slash-and burn fires of different intensities in rubber agroforests in Sumatra, Indonesia. *Agriculture Ecosystems Environment*, 92: 37-48.
- Khanna, P. K., Raison, R. and Falkiner, R. 1994. Chemical properties of ash derived from Eucalyptus litter and its effects on forest soils. *Forest Ecology and Management*, 66: 107-125.
- Merino, A., Jiménez, E., Fernández, C., Fontúrbel, M.T., Campo, J., Vega, J.A. 2019. Soil organic matter and phosphorus dynamics after low intensity prescribed burning in forests and shrubland. *Journal of Environmental Management*, 234: 214-225
- Neary, D. G., Klopatek, C. C., DeBano, L. F., and Ffolliott, P. F. 1999. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management*, 122: 51-71.

- Norgrove, L. and Hauser, S. 2015. Estimating the consequences of fire exclusion for food crop production, soil fertility, and fallow recovery in shifting cultivation landscapes in the humid tropics. *Environmental Management*, 55: 536-549.
- Penn, C.J. and Camberto, J. J. 2019. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture*, 9:120–138, doi:10.3390/agriculture9060120
- Pereira, P., Cerda, A., Martin, D., Úbeda, X., Depellegrin, D., Novara, A., Martínez-Murillo, J.F., Brevik, E.C., Menshov, O., and Miesel J. 2017. Short-term low-severity spring grassland fire impacts on soil extractable elements and soil ratios in Lithuania. *Science of the Total Environment*, 578: 469-475.
- Pereira, P., Cerdá, A., Úbeda, X., Mataix-Solera, J., Martin, D., Jordán, A. and Burguet, M. 2013. Spatial models for monitoring the spatio-temporal evolution of ashes after fire-a case study of a burnt grassland in Lithuania. *Solid Earth*, 4: 153-165. doi:10.5194/se-4-153-2013
- Pyne, S. J. 2001. *Fire: a brief history*. Weyerhaeuser Environmental Books, Cycle of Fire Series. Seattle, USA: University of Washington Press;
- Richards, L. A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agriculture handbook 60*. US Department of Agriculture, Washington, DC. 160 p.
- Ron, V., M. D., Edwards, A. E., Shand, C. A. and Cresser, M. S. 1993. Phosphorus fractions in soil solution: Influence of soil acidity and fertiliser additions. *Plant and Soil*, 148: 175–183.
- Roy, D. P.; Y. Jin; P.E. Lewis and C.O. Justice. 2005. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sensing Environment*, 97: 137-162.
- Terefe, T., Mariscal-Sancho, I., Peregrina, F. and Espejo, R. 2008. Influence of heating on various properties of six Mediterranean soils. A laboratory study. *Geoderma*, 143: 273-280.
- Thomas, G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. In *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods*. (Ed. DL Sparks) pp. 475–490. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Toledo, T. E.; Pohlan, H. A. J.; Gehrke, V. M. R. and Leyva, G. A. 2005. Green sugarcane versus burned sugarcane results of six years in the Soconusco region of Chiapas, Mexico. *Sugar Cane International*, 23: 20-27.
- Ubeda, X., Pereira, P., Outeiro, L., and 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: 589–609.
- Vega, J.A., Fontúrbel, T., Merino, A., Fernández, C., Ferreiro, A. and Jiménez, E. 2013. Testing the ability of visual indicators of soil burn severity to reflect changes in soil chemical and microbial properties in pine forests and shrubland. *Plant Soil*. 369:73–91. DOI 10.1007/s11104-012-1532-9
- Wiedenfled, B. 2009. Effects of green harvesting vs burning on soil properties, growth and yield of sugarcane in South Texas. *Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists* 29: 102-109.
- Zavala, L. M. M., de Celis Silvia, R. and López, A. J. 2014. How wildfires affect soil properties. A brief review. *Cuadernos de investigación geográfica/Geographical Research Letters* 40: 311-331.