

EFECTO DE LA QUEMA EN CAÑA DE AZÚCAR SOBRE EL CARBONO DE UN ANDISOL

Johnny Montenegro-Ballester¹, Marcos Chaves-Solera²

RESUMEN

Efecto de la quema en caña de azúcar sobre el carbono de un Andisol. En la producción de caña de azúcar la quema previa a la cosecha es una práctica común, la cual reduce la biomasa que potencialmente se incorporaría al suelo, por ello, se asume que disminuye el carbono orgánico del suelo. Esta investigación cuantificó en Turrialba, Costa Rica, el carbono orgánico por unidad de suelo en una plantación comercial de caña de azúcar, con y sin la práctica de quema previo a su cosecha. En el 2019 se implementó un diseño irrestricto al azar y se evaluaron tres tratamientos: a) un año de renovación de la plantación y cosecha en verde sin quema (testigo, T0), b) un año de renovación (T1) y c) cuatro años de renovación con quema previo a la cosecha (T4); todos con tres repeticiones. En ellas se recolectaron muestras de suelo hasta 70 cm de profundidad. Se determinó interacción ($P < 0,0018$) entre la profundidad y la quema en el contenido carbono orgánico, los valores disminuyeron marcadamente con la profundidad en T4 comparados a los de T0 y T1. La relación C/N del suelo se incrementó significativamente ($P < 0,0001$) con las veces que se quema previo a la cosecha, ya que los valores fueron mayores en T4 con respecto a los determinados en T0 y T1. El nitrógeno del suelo fue mayor ($P < 0,0016$) en T0 y T1 con respecto a T4. Se determinó correlación ($P < 0,0001$) entre el COS y el N, así como también entre la CE y el carbono, y entre el contenido de arcilla y carbono. Es notorio el efecto detrimental provocado por la quema en el contenido de carbono orgánico del suelo.

Palabras clave: Cambio climático, mitigación, gases con efecto invernadero, trópico, cultivos tropicales.

ABSTRACT

Effect of sugar cane burning on the carbon of an Andisol. In the commercial production of sugarcane, the pre-harvest burning is a common practice, however it reduces part of the organic matter that would be incorporated into the soil, so it is assumed that it causes the decrease of soil organic carbon. This investigation quantified in Turrialba, Costa Rica, the organic carbon per unit of soil in a commercial sugarcane plantation, with and without the pre-harvest burning practice. A randomized unrestricted design was implemented and

1 Autor para correspondencia. jmontenegro@inta.go.cr Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) – Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Costa Rica, ORCID: 0000-0001-8526-570X

2 Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA-LAICA) Costa Rica, email: mchavez@laica.co.cr; ORCID: 0000-0001-9646-5491

three treatments were evaluated: one year of plantation renewal and green harvest (without burning) (control, T0), one (T1) and four (T4) years of plantation renewal with pre-harvest burning, all with three repetitions. The soil samples up to 70 cm deep were collected. There was determined that the organic carbon decreased with depth, determining interaction ($P < 0.0018$) with the burning practice being higher the values in T0 and T1 with respect to those of T4. The carbon content was lower in the deeper layers of the soil when burned four times. The C/N ratio varied significantly ($P < 0.0001$) with the times that the burning prior to the plantation harvest is applied; the values of this ratio increased in T4 with respect to those determined in T0 and T1. The soil nitrogen was higher ($P < 0.0016$) in T0 and T1 than in T4. Correlation ($P < 0.0001$) was determined between the C/N and N content, as well as between C/N and carbon, and between clay and carbon content. The detrimental effect of burning on the content of organic carbon in the soil profile is clear.

Keywords: Climate change, mitigation, greenhouse gases, tropic, tropical crops.

INTRODUCCIÓN

Aproximadamente 8,7 Gt (1 Gigaton = 1 billón de toneladas) de carbono se emiten a la atmósfera cada año a escala global, generadas a partir de fuentes de origen antropogénico (Lal 2008). En este contexto, el carbono orgánico del suelo (COS) y su potencial para convertirse en un sumidero para el dióxido de carbono atmosférico, ha sido ampliamente discutido en la literatura científica mundial debido al potencial y las ventajas que ofrece ante el creciente problema que el CO_2 viene ocasionando (Luo *et al.* 2010).

Se estima que aproximadamente 2 344 Gt de COS se almacenan en los 3 m superiores del suelo, con 54% en el primer metro y cerca del 26% en los primeros 20 cm (Jobbágy y Jackson 2000; Guo y Gifford 2002), lo cual representa más de cuatro veces el carbono biótico terrestre que es de alrededor de 560 Gt.

Es por esta razón, que el suelo ha sido reconocido como un importante contribuyente al secuestro de carbono atmosférico y los sistemas agrícolas han sido identificados por el aporte que pueden realizar en este sentido, ya que pueden aumentar su contenido de carbono cuando son tratados y orientados hacia ese objetivo (Lal 2004; West y Post 2002). Se infiere de lo anterior, la importancia y necesidad de incorporar e implementar prácticas agrícolas que contribuyan

a mantener e incrementar el contenido de COS y evitar por otra parte, realizar actividades que vayan en detrimento de los contenidos ya existentes.

De manera que, asociando la dirección del cambio acontecido en la cantidad de carbono, con las prácticas de manejo del mismo, se podrían identificar aquellas que contribuyen ostensiblemente con el mantenimiento, incremento y/o disminución del carbono del suelo, lo cual es de suma importancia para interpretar y sustentar con buen criterio y argumento técnico, la sostenibilidad y el mejoramiento del sistema de producción agrícola.

Una práctica antigua pero comúnmente empleada en la agricultura mundial para facilitar la preparación del suelo, previo al establecimiento de un nuevo cultivo, o bien la cosecha manual o mecánica de diferentes productos, es la quema de la biomasa en el campo. Sin embargo, con ella se pierde por volatilización durante la combustión gran cantidad de carbono, así como también nitrógeno (N) y azufre (S) (Chaves 1999, 2017). Es en este contexto, que la quema ha sido identificada como una práctica que potencialmente puede contribuir a la degradación del suelo debido a la disminución del contenido de materia orgánica y a la pérdida de nutrimentos esenciales que podían incorporarse al mismo.

La quema reduce parte de la materia orgánica que eventualmente se incorporaría al suelo, lo que varía significativamente de acuerdo con las condiciones del entorno, valorado en indicadores tales como: clima, edad de la planta y grado de turgencia de la materia vegetal, entre otras, las que determinan la “calidad de quema” que se genere (Chaves 2006a, 2006b, 2019a, b, 2020a, b). Se asume por ello, que la combustión de la biomasa provoca la disminución del COS, lo cual tiene un rol clave en el balance global de carbono y la productividad agroindustrial del cultivo. La dinámica del carbono orgánico contenido en el suelo tiene, por tanto, una implicación local crítica y directa para el sistema de producción agrícola y otra global, relacionada directamente con el cambio climático.

Lo anterior es apoyado por Sornpoon *et al.* (2013), quienes determinaron que, en una plantación de caña de azúcar sin quema durante cinco años consecutivos, se aumentó el COS a una tasa de $1,37 \text{ Mg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$. También reportaron que la quema condujo a la reducción aproximada del 15% del total de carbono en el horizonte superficial del suelo (0-30 cm).

De igual manera, Galdos *et al.* (2009) trabajando en un Oxisol arcilloso en Brasil, determinaron que el contenido de carbono total del suelo en los primeros 10 cm fue 30% mayor en un lote de caña no quemado, comparado con otro en donde sí se realizó quema. En otro estudio efectuado también en Brasil, la tasa de acumulación de carbono en el suelo fue de $320 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ luego de 12 años de conversión de la cosecha de quemado a verde (La Scala *et al.* 2012). Otras investigaciones sobre el mismo tema muestran la misma tendencia (La Scala *et al.* 2006; Robertson y Thorburn 2007; Franzluebbbers 2010).

La distribución del carbono orgánico en el perfil del suelo es otra consideración para tomar en cuenta cuando se valora y estima el secuestro de carbono. Aunque los estudios típicamente se enfocan y concentran en los 10-20 cm superiores del perfil del suelo (Franzluebbbers 2010), es reconocido que pueden existir cantidades apreciables de carbono en horizontes internos más profundos (Jobbagy y Jackson 2000).

Los mecanismos de acumulación de carbono en el subsuelo consideran la incorporación de las raíces y sus exudados, el transporte vertical de materia orgánica disuelta y la bioturbación (Rumpel y Koegel-Knabner 2011), lo que es particularmente relevante porque al localizarse más profundo, tiende a tener un tiempo de residencia más prolongado (Rumpel *et al.* 2002; Schöning y Kögel-Knabner 2006). En este sentido, la caña de azúcar posee un sistema radical robusto, profuso y profundo que contribuiría significativamente a incrementar la presencia de esta forma de carbono más estable en el suelo. Estudios previos muestran que hay evidencia de que el COS puede acumularse en el subsuelo; por ejemplo, en Australia se determinó que sitios con antecedente de ser cultivados sistemáticamente por muchos años con caña de azúcar, tenían más carbono orgánico a una profundidad de 50-80 cm con respecto a los sitios con pocos años de mantenerse bajo cultivo (Skjemstad *et al.* 1999).

En Costa Rica, la quema en los sistemas de producción comercial de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es muy antigua, está tutelada y regulada legalmente y los productores deben seguir y aplicar un protocolo técnico para poder efectuarla (Chaves y Bermúdez 2006b, 2020b). Es una práctica mediática y muy cambiante que se realiza en aproximadamente el 60% del área sembrada; sin embargo, no existe información relacionada con posibles variaciones del COS como resultado de la aplicación de esta práctica en Costa Rica.

Es por ello que se hace interesante y necesario cuantificar no solo el contenido y distribución del carbono en el perfil del suelo, sino también los cambios que podrían estarse produciendo en el tiempo en la cantidad de carbono acumulado en el suelo como consecuencia de la quema de plantaciones comerciales de caña de azúcar.

Por lo anterior, el objetivo principal de la presente investigación fue cuantificar el contenido de carbono orgánico del suelo en una plantación comercial de caña de azúcar, con y sin ejecución de la práctica de quema previa cosecha, ubicada en condiciones agroclimáticas típicas del trópico húmedo (Turrialba, Cartago).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en el 2019 en una finca comercial productora de caña de azúcar situada en el cantón de Turrialba, provincia de Cartago, Costa Rica, donde se seleccionaron lotes comerciales homogéneos en cuanto a características de suelo (drenaje, textura, topografía, grado de fertilidad), en los cuales, basados en la ejecución o no de la práctica de la quema para ejecutar la cosecha, se identificaron parcelas con características análogas donde se realizaron los muestreos de suelo.

2.1. Ubicación

El estudio se efectuó en la finca “La Isabel”, situada en la región de Turrialba (10°32′ Latitud Norte, 85°15′ Longitud Oeste y 630 msnm). Se realizaron muestreos en un suelo del orden taxonómico Andisol, suborden Udands, de origen volcánico. La región se clasifica como Bosque Húmedo Tropical (Holdridge 2000) y presenta temperatura y precipitación promedio anual de 22,9°C y 2 411 mm, respectivamente.

La estrategia utilizada para estudiar la dinámica temporal del carbono del suelo se basó en una cronosecuencia, que consiste en evaluar áreas similares y homogéneas en cuanto a condiciones de suelo, clima y topografía, en este caso con diferentes períodos de aplicación de la quema.

2.2. Manejo de la plantación

Esta finca ha estado produciendo caña por más de 25 años consecutivos, con renovación de las plantaciones agotadas cada seis años. La distancia de siembra utilizada es de 1,5 m entre surcos y la fertilización consiste en la aplicación de 135, 27 y 210 kg de N, P₂O₅ y K₂O ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente, en ciclo soca o retoño. El control de malezas se realiza mediante la aplicación de herbicidas químicos en pre emergencia. La corta de la caña se efectúa una vez al año a la edad de 12 meses, por lo general entre febrero y marzo.

En la plantación donde se utilizó la práctica de la quema se seleccionaron parcelas que presentaban diferente edad luego de la siembra y renovación del cultivo: uno y cuatro años, en las cuales se realizaron los muestreos de suelo. En el caso de las parcelas donde no se quemó, solamente se pudo disponer de un lote representativo con edad de renovación de un año (12 meses).

2.3. Variedades cultivadas

Las variedades sembradas comercialmente fueron: B76-259, B77-95 y RB 86-7515, todos materiales genéticos de muy alta aceptación y distribución en la región de Turrialba y otras localidades cañeras del país, debido a sus características agroindustriales favorables (Chaves 2018a, b).

2.4. Tratamientos

Como se mencionó previamente, se incluye la variable quema, una práctica que se ejecuta aproximadamente en el 60% del área sembrada de caña de azúcar en Costa Rica, por lo que los tratamientos evaluados en lotes comerciales fueron:

1. Cosecha en verde (sin quema) que operó como Testigo, T0.
2. Plantación con un año de renovación con quema previo a la cosecha, T1.
3. Plantación con cuatro años de renovación con quema previa a la cosecha, T4.

Hay que aclarar, que las parcelas de cosecha en verde han sido con anterioridad regularmente quemadas, exceptuando la cosecha posterior a la renovación, lo cual implica que, al momento de realizar el muestreo del suelo, esas parcelas tenían aproximadamente 16 meses desde la última quema y solamente un año en el cual se incorporó todo el material vegetal remanente de la cosecha. Los otros dos tratamientos se ubican en parcelas con largo historial de quemadas continuas.

En cada tratamiento se establecieron tres parcelas de muestreo que actuaron como repeticiones.

2.5. Muestreo del suelo

Se realizaron muestreos de suelo en cada repetición y para cada condición evaluada: quema y no quema. Las muestras de suelo fueron obtenidas de acuerdo con la metodología utilizada por el Department of Environment and Heritage Protection (2016) y fueron recolectadas en el punto establecido entre la distancia media de la entrecalle y el centro del surco.

El muestreo de suelo se efectuó con un equipo mecánico marca Eijkelkamp provisto de un barreno cilíndrico diseñado para tomar muestras no disturbadas. Las muestras recolectadas en el campo se clasificaron de acuerdo con su profundidad, siguiendo la metodología del IPCC (2006), en la cual los primeros 30 cm se dividieron en secciones de 10 cm y a partir de esa profundidad en secciones consecutivas de 20 cm hasta obtener la máxima profundidad (70 cm) a la que se pudo introducir el barreno. El punto de muestreo se registró con GPS.

2.6. Diseño experimental y análisis estadístico

Se implementó un diseño experimental irrestricto al azar con tres tratamientos y tres repeticiones. Los datos fueron analizados realizando un ANDEVA y la comparación de medias mediante la prueba de Tuckey al 5%, utilizando la diferencia mínima significativa (DMS) en InfoStat (DiRienzo *et al.* 2018).

2.7. Análisis de laboratorio

Las muestras de suelo recolectadas fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) de Costa Rica, donde se determinaron: densidad aparente por el método del cilindro; carbono y nitrógeno mediante combustión seca de Dumas y textura por el método de Bouyucos. El pH se determinó en agua (relación suelo-agua 1:2,5) utilizando un potenciómetro; en el caso de la conductividad eléctrica, esta se determinó por el método de la pasta seca.

2.8. Cálculo de carbono

Como primer paso en el cálculo del contenido de carbono presente en el suelo, se hizo la corrección a masa equivalente de suelo (MES), para lo cual se utilizó la siguiente ecuación (Livestock Environmental Assessment and Performance 2018):

Ec. 1

$$\text{MES} = \frac{\sum M_{bi}}{\sum V_{bi}} * t_i * 100$$

Donde:

- MES (t suelo ha⁻¹) es la masa equivalente de suelo (se utilizará en la Ecuación 3),
- n es el número de muestras agrupadas,
- $\sum M_{bi}$ (t) es la suma de las masas de las muestras agrupadas,
- $\sum V_{bi}$ (m³) es la suma de los volúmenes de todas las muestras agrupadas,
- t_i (cm) corresponde a la profundidad de muestreo aplicada.

El contenido de carbono en el suelo se calculó de acuerdo con la Ecuación 2, como sigue:

Ec. 2.

$$\text{COS (t C ha}^{-1}\text{)} = \text{CO}_i * P_i * \text{densidad}_i$$

Donde:

- COS (t C ha⁻¹): es la cantidad de carbono orgánico del suelo, CO_i (mg C g⁻¹ suelo): es el contenido de carbono orgánico presente en la muestra *i*,
- P_i (cm): es la profundidad a la que se tomó la muestra *i*,
- Densidad (g cm⁻³): es la Densidad Aparente de la muestra *i*.

Finalmente, se comparó el contenido de carbono orgánico del suelo por tonelada de suelo de acuerdo con la Ecuación 3:

Ec. 3

$$\text{COS (kg C t}^{-1} \text{ suelo): } \text{COS}_i \text{ (t C ha}^{-1}) / \text{MES (t de suelo ha}^{-1}) * 1.000$$

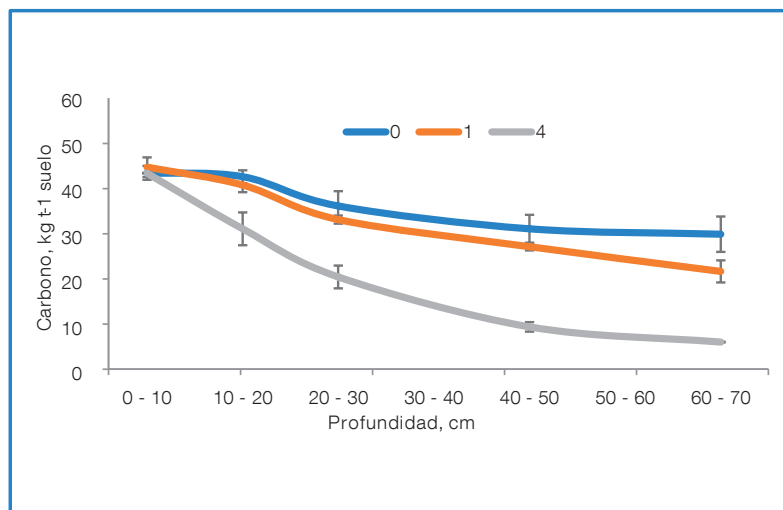
Donde:

- COS (kg C t⁻¹ suelo): cantidad de carbono orgánico del suelo por tonelada de suelo a la profundidad *i*,
- COS_{*i*} (t C ha⁻¹): cantidad de carbono orgánico del suelo a la profundidad *i*,
- MES (t de suelo ha⁻¹): masa equivalente de suelo calculada para cada área de estudio (Ec. 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Distribución del carbono orgánico en el perfil del suelo

El contenido de carbono en el perfil del suelo presentó la misma tendencia en todas las parcelas muestreadas, disminuyendo su concentración con la profundidad (Figura 1).



Valores promedio ± 1 error estándar (EE)

0, 1, 4: veces que se ha aplicado la quema

Figura 1. Distribución del carbono orgánico en el perfil de un suelo con diferente número de quemas en caña de azúcar. Turrialba, Costa Rica. 2019.

Un aspecto que destacar es el hecho de que no hubieron diferencias estadísticas en los valores de carbono orgánico determinados en la parcela no quemada (T0) y aquella donde solo se realizó una quema (T1), aunque en ésta última hubo tendencia a mostrar menor contenido de carbono. La parcela con cuatro quemas (T4) mostró valores inferiores de carbono los cuales disminuyeron con la profundidad (Figura 1).

3.2. Contenido de carbono orgánico del suelo según profundidad

Se determinó interacción ($P < 0,0018$) entre la profundidad (cm) y la práctica de la quema en la cantidad de carbono contenido en el suelo (Cuadro 1).

Los valores de carbono fueron mayores en las capas superiores del suelo y con la excepción de los primeros 10 cm de profundidad en T4, la cantidad disminuyó de manera significativa con respecto al número de quemas realizada y la profundidad de muestreo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Contenido de carbono por tonelada de suelo, según profundidad y quema en un cultivo de caña de azúcar. Turrialba, Costa Rica. 2019.

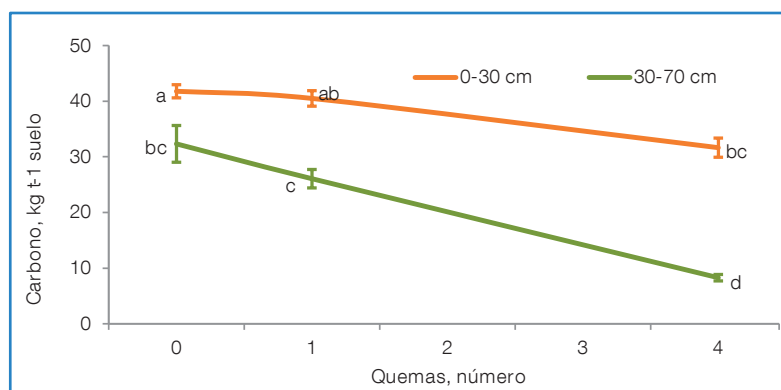
Profundidad, cm	kg C t ⁻¹ suelo		
	Quemas		
	0	1	4
0 – 10	44,3±1,5 ^{ab}	45,5±2,2 ^a	44,2±0,1 ^{abcd}
10 – 20	43,5±1,4 ^{abc}	41,6±1,6 ^{abcd}	32,0±3,6 ^{efg}
20 – 30	37,1±3,3 ^{abcde}		21,4±2,5 ^{gh}
30 – 50	32,0±3,1 ^{bcdef}	34,0±0,9 ^{abcdef}	10,4±1,0 ^{hi}
50 – 70	30,8±3,9 ^{defg}	28,1±0,8 ^{efg}	7,1±0,1 ⁱ
		22,6±2,4 ^g	

Valores promedio ± 1 error estándar (EE) con letra diferente difieren al nivel $P < 0,05$

0, 1, 4: veces que se ha aplicado la quema

La cantidad de carbono por unidad de suelo para el perfil completo (0-70 cm), está influenciada y determinada por la quema, ya que los valores fueron mayores ($P < 0,0001$) cuando no se quemó (T0: 36,4±1,6 kg t⁻¹ de suelo) o cuando solo se realizó una quema (T1: 32,4±1,9 kg t⁻¹ de suelo), con respecto a aquel determinado cuando se efectuaron cuatro quemas (T4: 18,4±2,9 kg t⁻¹ de suelo).

La reducción del carbono se evidencia y comprueba cuando se analiza e interpreta el perfil de acuerdo con respecto a la profundidad sugerida y recomendada por el IPCC (0 – 30 cm); así como en la sección más profunda del perfil evaluado, cuando se comparan los valores del tratamiento con una quema (T1) o sin quema (T0) con aquel que tiene cuatro quemas (T4, Figura 2).



Valores promedio ± 1 EE con letra diferente difieren al nivel $P < 0,05$

Figura 2. Efecto de la quema en caña de azúcar en el contenido de carbono por unidad de suelo según profundidad. Turrialba, Costa Rica. 2019.

3.3. Cambio en el contenido del carbono del suelo

Se observó el efecto directo de la quema en el contenido de carbono orgánico por unidad de suelo. La reducción anual promedio del COS fue mayor de los 30 a los 70 cm de profundidad con respecto al observado entre 0 y 30 cm de profundidad, independientemente del número de quemaduras realizadas al cultivo (Cuadro 2). En los primeros 30 cm de profundidad parece existir tendencia a incrementarse la reducción de carbono con respecto a las veces que se realiza la quema (Cuadro 2). El dato reportado es la diferencia entre T1 o T4 con respecto a T0, dividido entre el número de veces que se ha ejecutado la quema.

Cuadro 2. Efecto de la quema previo a la cosecha de la caña de azúcar en el contenido de carbono por unidad de suelo. Turrialba, Costa Rica. 2019.

Número de quemaduras	kg C t ⁻¹ suelo año ⁻¹	
	Profundidad, cm	
	0-30	30-70
1	-1,2±1,0	-6,1±4,9
4	-2,5±0,6	-6,0±0,9

Valores promedio ± 1 EE

La disminución del carbono en el suelo como resultado de la quema reiterada y continua de biomasa es importante y debe ser corroborada con evaluaciones aplicadas en un periodo más prolongado de tiempo, para determinar y juzgar con mayor certeza si realmente la reducción se debe o no a este factor.

El contenido de carbono orgánico del suelo fue afectado negativamente y disminuido por la práctica de quemar la plantación previa cosecha de la caña. Esto es coincidente con lo reportado por varios investigadores en países tales como Brasil (Galdos *et al.* 2009), USA (Selim *et al.* 2016) y Australia (Robertson y Thorburn 2007). Ello en buena parte, puede ser explicado por la reducción del material vegetal incorporado al suelo como consecuencia de la quema y combustión parcial de la biomasa, como lo demostraron Sandhu *et al.* (2013) en las determinaciones realizadas en los USA y Costa Rica.

La biomasa orgánica que se produce durante el ciclo vegetativo de crecimiento de las plantas de caña y particularmente durante la cosecha de la plantación, son una fuente importante de suministro de carbono en el suelo, por lo que su eliminación o reducción por causa de la práctica de la quema afecta negativamente su incorporación al suelo y con ello, las reservas del carbono del mismo; así como también intrínsecamente el equilibrio de gases con efecto invernadero (Tenelli *et al.* 2019). En este sentido, varias investigaciones han demostrado mayor emisión (entre 7,4 y 61,5%) de óxido nitroso (N₂O) en áreas quemadas con respecto a aquellas no quemadas (Chalco *et al.* 2017).

Se debe considerar adicionalmente el efecto que tiene la cobertura vegetal del suelo en la regulación de su temperatura y, en consecuencia, en la actividad microbiana. Al incrementarse la cobertura vegetal del suelo por la presencia de los residuos del cultivo remanentes luego de efectuada la cosecha de la caña de azúcar cuando no se quema, se induce la reducción de la temperatura (Sandhu *et al.* 2013), lo cual tiene efecto detrimental en la actividad microbiana (Lal 2004) que favorece el almacenamiento del carbono en el suelo. Lo contrario sucede cuando se quema. Esto también contribuiría a explicar por qué el T4 mostró los valores más bajos de COS (Cuadro 1).

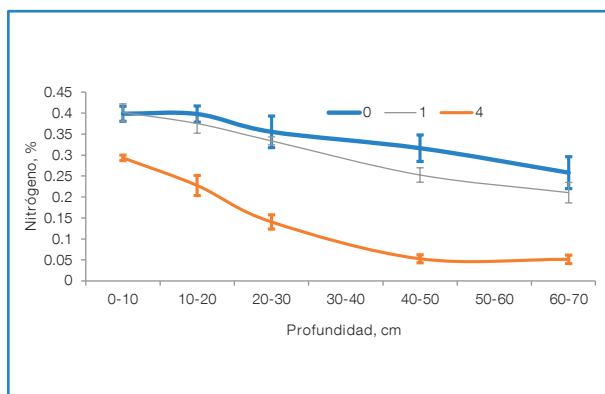
Un aspecto interesante observado en esta investigación fue que las mayores diferencias en el contenido de COS entre ambos manejos (quema vs no quema, Cuadro 2), ocurren a profundidades por debajo de la zona típica de determinación del carbono en el suelo, pues fueron notorias las variaciones a partir de los 30 cm de profundidad (Figura 2). Esto es congruente con lo reportado por Selim *et al.* (2016), quienes señalaron la importancia de determinar el COS a mayores profundidades, lo cual, para el caso particular de la caña de azúcar, es muy válido y recomendable virtud de la excepcional capacidad de exploración de su sistema radical (Chaves 1999, 2018a, 2019c).

Sin embargo, hay que considerar también el efecto provocado por la renovación del cultivo, lo cual se practica en Costa Rica por lo general cada 5-6 años en ciclos vegetativos de 12 meses (Chaves 2019c) y que presumiblemente debido a las labores implicadas en la preparación del suelo, provocan y favorecen que se pierda parte del carbono almacenado en el suelo por causa de la oxidación y mineralización a que es sometida (Chaves 1999, 2017).

Diferentes trabajos de investigación muestran este efecto, ya que la ruptura del suelo por la maquinaria agrícola hace posible la rápida descomposición del carbono protegido en los agregados del suelo, donde se incrementa la disponibilidad del oxígeno y la temperatura, lo cual mejora el ambiente para favorecer la actividad de los microorganismos (Chaves 1999; Galdós *et al.* 2009; Six *et al.* 2002; La Scala *et al.* 2006). Esta condición sumada a la reducción de la incorporación de residuos vegetales del cultivo por efecto de la quema, contribuyen también a disminuir significativamente los niveles de COS, tal y como se demostró en la presente investigación en el Tratamiento T4. No puede tampoco omitirse ni dejarse de considerar la significativa variabilidad natural que el nitrógeno muestra en el suelo, virtud de su dinámica y movilidad, lo que sugiere mucha prudencia en su interpretación (Chaves 2009, 2017).

3.4. Concentración y distribución de nitrógeno en el suelo

Se determinaron diferencias importantes ($P < 0,0016$) en la concentración del nitrógeno contenido en el suelo. Los valores fueron similares ($P > 0,05$) para las condiciones de no quema (T0) y cuando se realizó uno solo de estos eventos (T1) luego de la siembra (Figura 3). Cuando se quemó en repetidas ocasiones (T4) los valores de nitrógeno fueron notablemente inferiores.



Valores promedio \pm 1 EE

0, 1, 4: veces que se ha aplicado la quema

Figura 3. Distribución del nitrógeno en el perfil del suelo con o sin quema en un cultivo comercial de caña de azúcar. Turrialba, Costa Rica. 2019.

El contenido de nitrógeno presente en el perfil del suelo muestra claramente como su concentración es menor (Figura 3) cuando se ha realizado reiteradamente la práctica de la quema, lo cual compromete el crecimiento y posterior rendimiento del cultivo, con el consiguiente efecto en la cantidad de biomasa que al final del ciclo de cultivo será incorporada al suelo (Selim *et al.* 2016; Chaves 2020b), debido a que el nitrógeno ha demostrado ser un importante insumo que contribuye positiva y de manera determinante al incremento y mejoramiento de la productividad agroindustrial de la caña de azúcar (Chaves 1999, 2017, 2019c; Rasche *et al.* 2014).

La menor cantidad de nitrógeno en el suelo se explica por la pérdida del nutrimento por volatilización acontecida durante la quema, siendo la pérdida cercana a la totalidad del N contenido en la biomasa quemada, tal y como lo determinaron Hernández y López (2002).

3.5. Relación Carbono/Nitrógeno

La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) del suelo varió significativamente ($P < 0,0001$) con respecto al número de veces en que ocurrió la quema previa a la cosecha de la plantación. Los valores fueron similares en el tratamiento sin quema (T0) y en aquel donde se quemó solamente una vez (T1, Cuadro 3). Sin embargo, esos valores son inferiores ($P < 0,05$) al que se determinó cuando la quema ocurrió cuatro veces (T4) después de la siembra.

Lo anterior puede ser visto desde una mejor perspectiva con la distribución de esta relación en el perfil del suelo (Figura 4). Los valores fueron similares en T0 y T1; sin embargo, mayores valores con significancia estadística (Cuadro 3) y estables de la relación, se detectaron en T4.

Cuadro 3. Relación Carbono/Nitrógeno (C/N) con o sin la práctica de la quema en un cultivo de caña de azúcar. Turrialba, Costa Rica. 2019.

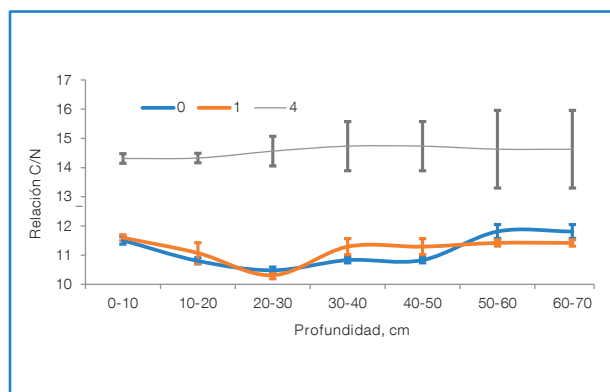
Quemas	Relación C/N
0	11,1±0,2 ^b
1	11,2±0,2 ^b
4	14,6±0,2 ^a

Valores promedio ± 1 EE

Promedios con diferente letra difieren al nivel P<0,05

Los resultados evidencian que existe un incremento importante en la relación y proporcionalidad de estos nutrimentos en T4, inducida posiblemente por la pérdida de nitrógeno volatilizado durante la combustión del material vegetal más rápidamente degradable, y al consecuente incremento del material fibroso remanente para descomposición posterior. Ello se refleja en el aumento del valor de la relación. Cabe señalar, que la misma se mantiene en valores muy deseables desde el punto de vista de velocidad de descomposición (Chaves, 1999, 2017).

Sin embargo, hay que tener presente que debido a la naturaleza de ese proceso, un año sin quema no ofrece datos concluyentes para lograr una comparación fehaciente y consistente del efecto de esta práctica con respecto a la no ejecución de la misma. Por este motivo, estos datos deben ser tomados con la debida reserva y precaución.



Valores promedio ± 1 EE

0, 1, 4: veces que se ha aplicado la quema

Figura 4. Relación Carbono/Nitrógeno en el perfil del suelo, con o sin quema en un cultivo comercial de caña de azúcar. Turrialba, Costa Rica. 2019.

En general y para los datos de todos los tratamientos, se determinó correlación ($P<0,0001$) entre el contenido de C y el de N, ambos expresados en porcentaje, observándose que, a mayor contenido de carbono, mayor es la disponibilidad de nitrógeno en el suelo (Figura 5).

El análisis individual por tratamiento mostró que el menor ajuste ($r^2=0,83$) se determinó en T0, mientras que T1 y T4 mostraron mejores ajustes ($r^2=0,94$ y $0,98$, respectivamente).

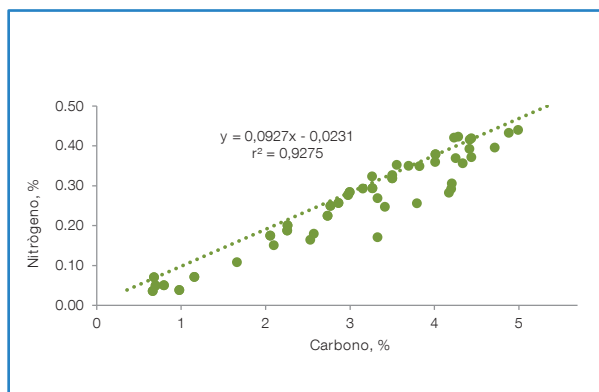
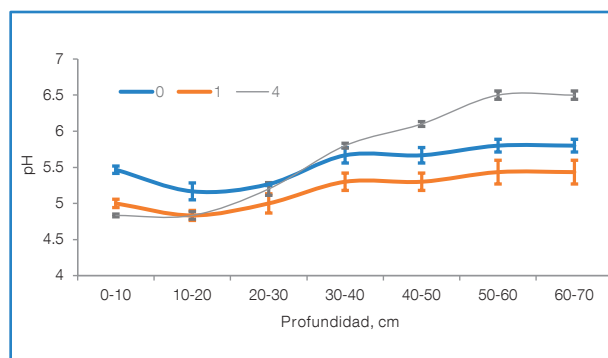


Figura 5. Relación entre el Carbono y Nitrógeno del suelo, con o sin quema en un cultivo comercial de caña de azúcar. Turrialba, Costa Rica. 2019.

3.6. Acidez del suelo

La acidez del suelo (pH) mostró valores similares entre los tratamientos presentados, un rango entre 4,7 y 6,3 unidades para una amplitud de 1,6 unidades (Figura 6), con tendencia a incrementar los valores con la profundidad de muestreo, siendo notorio el paralelismo que marcan la no quema (T0) y una quema (T1) a través de todo el perfil del suelo. El pH del T4 incrementó sus valores con la profundidad.



Valores promedio \pm 1 EE

0, 1, 4: veces que se ha aplicado la quema

Figura 6. pH en el perfil del suelo con o sin quema en un cultivo comercial de caña de azúcar. Turrialba, Costa Rica. 2019.

Estos valores muestran que conforme se incrementa la cantidad de veces que se quema la plantación, muy probablemente el calcio, magnesio y potasio que quedan remanentes en las cenizas producto de la combustión, son parcialmente lixiviados por las aguas de lluvia y llevados a capas más profundas del suelo, lo cual se manifiesta en mayores valores del pH como el observado en T4, lo que viene determinado por la textura Franco Arenosa del suelo (Cuadro 4) y el nivel de precipitación del lugar.

También hay que recordar que otras características edáficas del suelo como es su grado de acidez (pH), tienen relación directa con el COS. En este sentido, las determinaciones demostraron que los menores valores de pH se presentaron donde se observaron los mayores contenidos de COS en el suelo (Figs. 1 y 6), aspecto coincidente con los reportados en la literatura científica (Kemmitt *et al.* 2005, Kirk *et al.* 2010), donde a menor pH, mayor contenido de carbono. Sin embargo, no se determinó correlación significativa entre el pH y el contenido del COS.

Los suelos ácidos comparados con los suelos neutros o cercanos a esta condición favorecen la presencia y la actividad microbial en particular de los hongos, los cuales tienen efecto estabilizador en los

agregados y con ello, se estimula la acumulación de carbono en el perfil del suelo (Karlsson 2013).

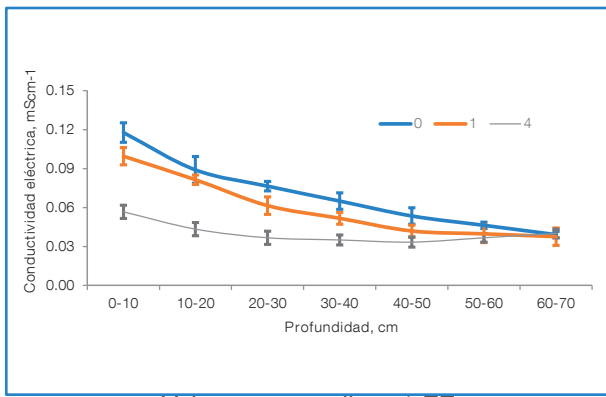
Al reducirse la cantidad y calidad de los residuos vegetales incorporados al suelo por la quema de la caña realizada previo a la cosecha, también se reduce la cantidad de H^+ que se libera al medio como parte de la mineralización de la MO. Uno de los productos finales de la descomposición de la materia orgánica son los ácidos orgánicos, algunos de los cuales son ácidos fuertes que disminuyen el índice de pH.

Además, la acumulación de materia orgánica en el medio puede reducir el pH ya que contiene grupos funcionales ácidos que pueden disociar el H^+ . A esta condición hay que adicionarle el efecto de la lluvia, la cual provoca el lavado de bases como Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ y con ello la reducción del pH (Karlsson 2013).

3.7. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es una medida indirecta de la cantidad de sales contenidas y disueltas en la solución del suelo, favoreciendo o no la presencia de condiciones que contribuyen con el crecimiento de las raíces y potencian el buen desarrollo de las plantas. Las sales medidas pueden ser de origen catiónico (sodio, calcio, magnesio, etc.) o aniónico (sulfatos, boratos, nitratos, carbonatos, etc.). En términos generales, valores de CE inferiores a $0,35 \text{ micro Siemens (mS) cm}^{-1}$ se relacionan con condiciones que estimulan el buen desarrollo del sistema radical y por ende del cultivo.

Los valores promedio determinados en Turrialba, una región muy lluviosa con más de 2.400 mm anuales, fueron inferiores a $0,15 \text{ mS cm}^{-1}$ y relativamente similares entre los tratamientos evaluados (Figura 7), lo que denota poca interferencia de las sales en el desarrollo de las plantas de caña.



Valores promedio ± 1 EE

0, 1, 4: veces que se ha aplicado la quema

Figura 7. Conductividad eléctrica en el perfil del suelo con o sin quema en un cultivo comercial de caña de azúcar. Turrialba, Costa Rica. 2019.

La distribución de la CE en el perfil del suelo evidencia que conforme la profundidad es mayor, disminuye la concentración proporcional de sales, posiblemente como resultado de su absorción por las raíces de la caña, las que al localizarse mayoritariamente en las capas superiores reducen la conducción, presencia y disponibilidad de las mismas en los horizontes más profundos. La mayor concentración de sales en las capas superiores es el resultado de la mineralización que ocurre en esa sección del perfil del suelo, con la subsecuente liberación de nutrientes catiónicos y aniónicos al medio, los cuales en buena medida se encuentran contenidos en forma de sales solubles. La evapotranspiración podría eventualmente favorecer también este comportamiento.

Se determinó correlación ($P < 0,0001$) entre el porcentaje de carbono del suelo con respecto a la conductividad eléctrica para T0 y T1, no así para T4 (Figura 8). La relación es positiva indicando que, a mayor CE, mayor es la cantidad de COS. Ello posiblemente señala que estas sales provienen de la descomposición de la materia orgánica, cuyo contenido es mayor en T0 y T1 tal y como se comentó anteriormente (Figura 1).

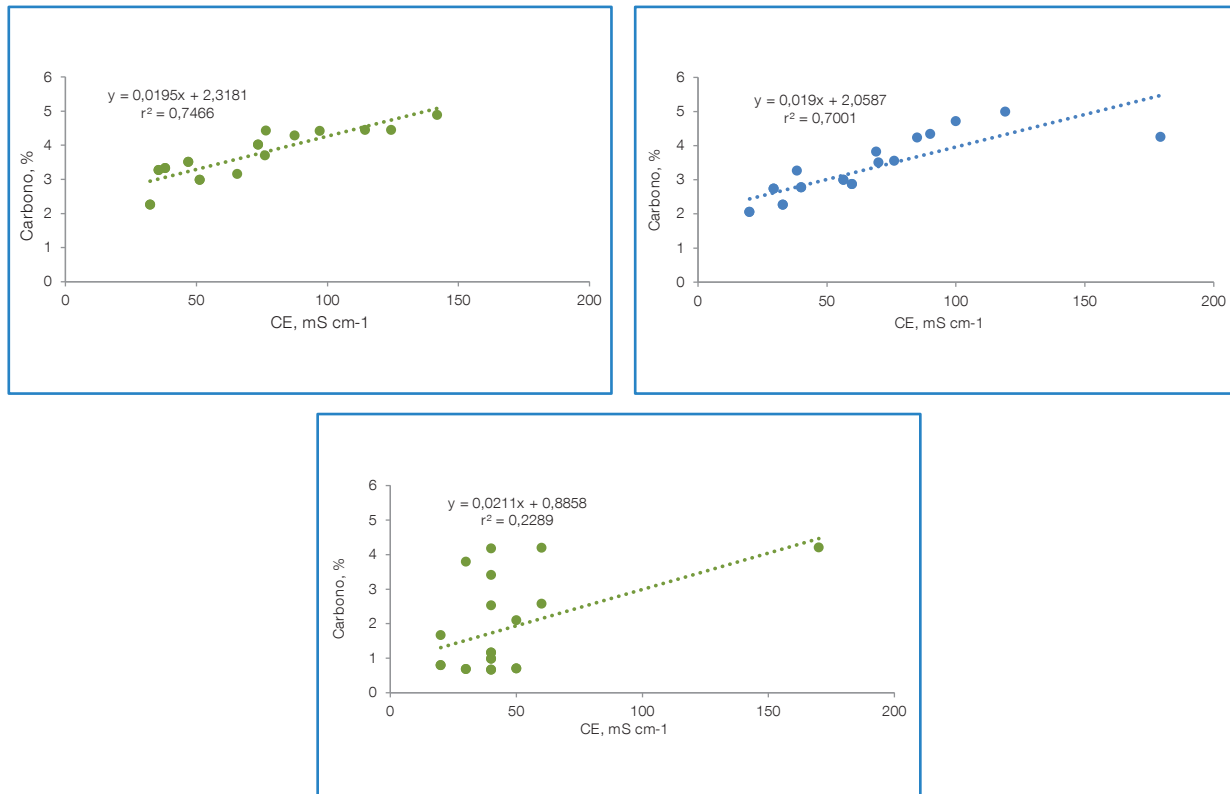


Figura 8. Relación entre el COS y la conductividad eléctrica en el perfil del suelo con o sin quema en un cultivo comercial de caña de azúcar. Turrialba, Costa Rica. 2019.

El menor contenido de materia orgánica en T4 (Figura 1) aunado a la mayor relación C/N (Figura 4) se refleja en la menor CE (Figura 7) y, en consecuencia, es claramente verificable en la baja relación con el carbono (Figura 8).

3.8. Textura y densidad aparente

Los contenidos de arcilla, limo y arena fueron muy similares a lo profundo del perfil para los tratamientos T0 y T1 (Cuadro 4), difiriendo T4 en los valores de arcilla y arena, los cuales fueron aproximadamente 20% superior e inferior, respectivamente, a los determinados en los otros tratamientos, aunque en todos los casos el suelo se clasifica como de textura franco

arenoso y por tanto muy favorable para efectos de infiltración, drenaje y evacuación de aguas, intercambio gaseoso, desarrollo radical, laboreo mecánico, potencial de compactación, entre otras propiedades.

A pesar de que el contenido de arcilla ha sido positivamente correlacionado con el contenido de carbono del suelo, esta relación no se observó en el T4 donde se determinaron los valores más altos de arcilla (Cuadro 4), pero los contenidos de COS fueron inferiores a los de T0 y T1 (Cuadro 1, Figura 2), lo cual es de suponer se debe al efecto que ejerce la quema en el contenido de carbono. Otros efectos pedogenéticos podrían haber acontecido en el lugar, pues por antecedente es una región con eventos importantes en el tiempo, sobre todo volcánicos y de inundación.

Cuadro 4. Contenido de arcilla (Arc.), limo (Lm.), arena (Ar.) y densidad aparente del suelo según profundidad, con y sin la práctica de la quema en un cultivo de caña de azúcar. Turrialba, Costa Rica. 2019.

Profundidad, cm	Arc./Lm./Ar. %		
	0	1	4
0-10	28/24/48	30/27/43	48/23/29
10-20	29/22/50	29/28/43	48/24/28
20-30	26/26/48	28/28/44	52/21/27
30-50	23/31/46	25/30/44	48/26/26
50-70	22/25/52	26/30/44	38/35/27
	Densidad		4
	Aparente, g cm ⁻³		
	0	1	
0-10	0,79±0,05	0,81±0,03	0,87±0,06
10-20	0,97±0,02	0,97±0,10	0,93±0,06
20-30	0,93±0,05	0,91±0,09	0,93±0,05
30-50	0,86±0,04	0,91±0,02	0,98±0,02
50-70	0,98±0,04	0,93±0,06	1,01±0,03

Valores de densidad aparente ± 1 EE

0, 1, y 4 se refieren al número de quemas

Lo anterior se puede observar en la correlación ($P < 0,0001$) existente entre los porcentajes de carbono y arcilla del suelo en los tratamientos T0 y T1 (Figura 9), donde se muestra que, a mayor contenido de arcilla, mayores son los valores de carbono del suelo. Sin embargo, ello no se manifiesta en T4 donde no hubo correlación entre las variables antes anotadas. Es conocido el efecto de retención de las arcillas (carga negativa) sobre los grupos húmicos del suelo, favorecido también por su mayor superficie de exposición.

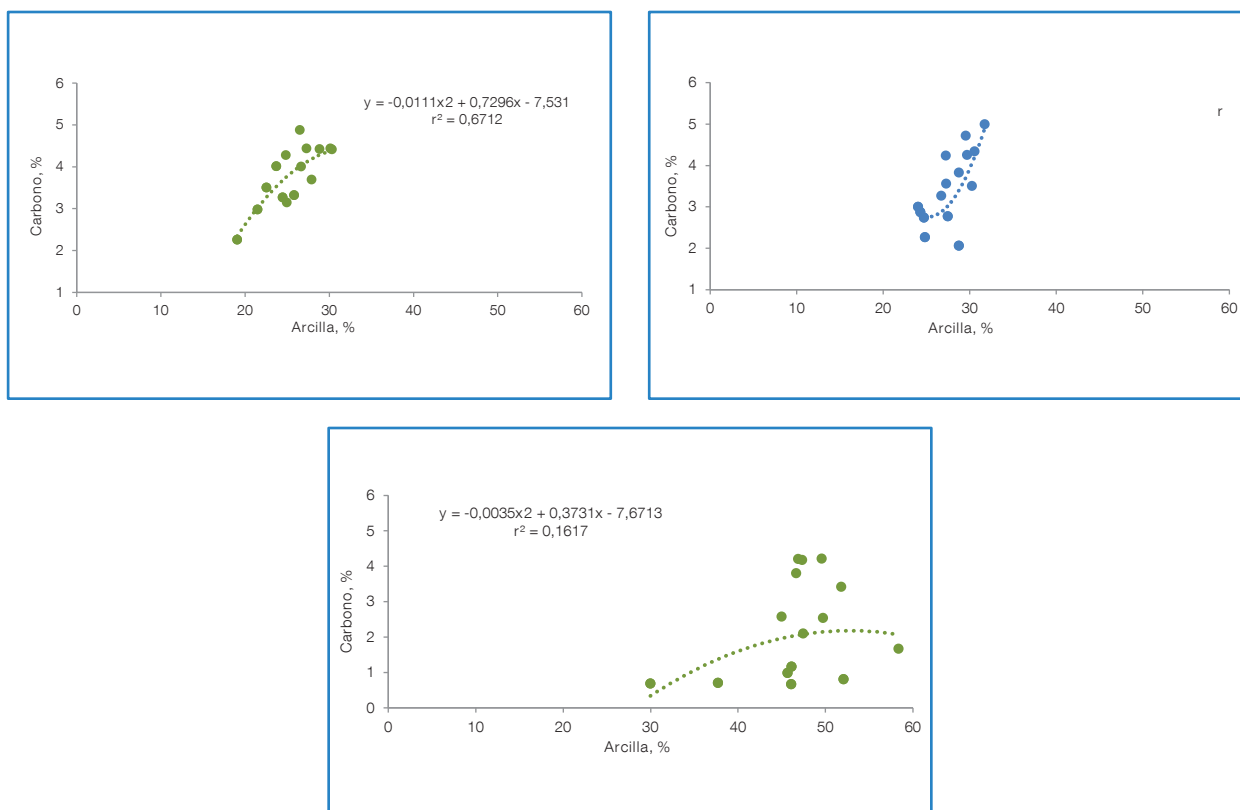


Figura 9. Relación entre el porcentaje de carbono y de arcilla, en el perfil del suelo de un cultivo comercial de caña de azúcar con o sin quema. Turrialba, Costa Rica. 2019.

También se debe considerar que la textura del suelo influye en la protección física de la materia orgánica (MO), ya que las arcillas, limitan el acceso de los microorganismos al material orgánico que se encuentra encapsulado en poros de tamaño muy pequeño. Es por ello que usualmente los suelos que contienen más arcilla también presentan mayores niveles de MO. El nivel freático puede en periodos de alta precipitación y con texturas finas, influir al respecto al generar condiciones anaeróbicas.

En esta investigación a pesar de que el lote donde se ubicaron las parcelas del tratamiento T4 mostró tener mayores contenidos de arcilla (Cuadro 4), comparado con los determinados en T0 y T1, los niveles de carbono orgánico fueron inferiores (Cuadro 1). Esto pone de manifiesto el claro efecto de la quema, que al reducir la cantidad de material vegetal que se incorpora al suelo, también reduce en el tiempo la fracción de MO que es encapsulada y protegida de la acción de los microorganismos (mineralización). Ello se manifiesta en valores bajos de COS.

En cuanto a la Densidad Aparente (DA) del suelo, los valores fueron similares en todos los tratamientos, pero con tendencia a ser mayores en T4, influido por el hecho de tener más arcilla (Cuadro 4) y menos COS (Cuadro 1). En todo caso y con excepción del T4 para la capa más profunda, los valores fueron inferiores a $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ lo que se considera óptimo pues se aleja de condiciones físicas inconvenientes que afectan el normal desarrollo de las plantas por reducción del espacio poroso. Resulta destacable mencionar que la DA no se incrementó con la profundidad del suelo en T0 y T1, lo que denota un buen balance fraccional de partículas y ausencia de condiciones de compactación, anaerobiosis y adensamiento del suelo (Chaves, 2017). Esta tendencia si se observó en T4.

De acuerdo con la condición y sistema de manejo convencional de la plantación de caña de azúcar muestreada, es claro el efecto detrimental que provoca la quema en el contenido del carbono orgánico presente en el perfil del suelo. La reducción ocurre a partir de los 10 cm de

profundidad y la disminución del carbono se manifestó con mayor intensidad luego de acontecer sucesivas quemaduras posteriores a la renovación de la plantación.

En cuanto a la disposición y distribución del carbono en el perfil del suelo, hubo mayor concentración en la sección superior del mismo (0-10 cm), con un patrón descendente conforme aumentó la profundidad.

La práctica agrícola de quemar las plantaciones comerciales de caña de azúcar para su cosecha, parece influenciar de manera determinante la relación C/N del suelo, ya que los valores se incrementan con relación al número de quemaduras efectuadas, independientemente de la profundidad de suelo explorada. El nitrógeno se ve reducido por la quema e incrementando con ello el valor de la relación C/N, cuyos valores fueron sin embargo aceptables en todos los tratamientos, ubicándose en niveles recomendables. El pH no mostró ser influenciado de manera significativa por la quema, ya que se determinaron valores similares en los tratamientos evaluados. Lo mismo se observó en el caso de la conductividad eléctrica.

Es necesario continuar con los muestreos sistemáticos y la valoración de las mismas variables en periodos más prolongados de tiempo, en los mismos puntos empleados en la presente investigación, para corroborar o determinar posibles nuevas tendencias en la cantidad y ubicación del carbono presente en el perfil del suelo.

Se hace necesario explorar y comprobar la posible variación que puede inducir la naturaleza genética y las características fenotípicas de la variedad de caña sembrada, en el nivel de productividad agroindustrial de la finca y el contenido de carbono orgánico presente en el suelo, pues ello está directamente ligado a la cantidad de biomasa producida e incorporada al mismo antes (por despaje de la planta) o después de la cosecha (Chaves 2018ab, 2019bc).

Factores como orden y suborden taxonómico del suelo también sería interesante incluirlos como variables de estudio, para ir determinando de manera concluyente la influencia de los mismos y su relación con la cantidad de carbono presente.

Sería de gran valor incluir en futuras investigaciones la utilización de los isótopos de carbono ya que contribuiría a clarificar no solo la proporción del carbono del suelo que es producto de la incorporación de material vegetal de la caña, sino también la presencia y remanencia del carbono proveniente de la cobertura vegetal original.

Finalmente, la evaluación de la fracción de la materia orgánica rápidamente descomponible como la particulada (conocida como POM por sus siglas en inglés), y que se ha utilizado como indicador para monitorear la calidad del suelo en diversas investigaciones, es importante de valorar, ya que contribuiría a identificar los cambios que se están produciendo en la MO en el corto plazo, como resultado del manejo agronómico del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se desarrolló bajo el proyecto “Cuantificación y determinación de carbono orgánico del suelo bajo diferentes actividades agropecuarias de Costa Rica”, que forma parte de la Cuarta Comunicación Nacional y el Segundo Informe Bienal de Actualización de Costa Rica ante la CMNUCC – 00098756 y que fue implementado bajo la tutela del Convenio entre el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), con el financiamiento parcial del Fondo Global del

Ambiente (GEF por sus siglas en inglés) Costa Rica. También se agradece el apoyo financiero de FUNDECOOPERACION, lo cual hizo posible el desarrollo del estudio. Asimismo, se agradece a la Ing. Agr. Kathia Carvajal del IMN, como al personal profesional de LAICA (DIECA) en especial al Ing. Agr. Gilberto Calderón A., por todo el apoyo recibido durante las labores de muestreo de campo.

Un especial agradecimiento al Ing. Agr. Rolando Picado por permitir realizar los muestreos en la finca “La Isabel”, ubicada en Turrialba.

LITERATURA CITADA

- Chalco, J; Valeiro, A; Posse, G; Acreche, M. 2017. To burn or not to burn: The question of straw burning and nitrogen fertilization effect on nitrous oxide emissions in sugarcane. *Science of the Total Environment* 587-588:399-406.
- Chaves Solera, M. 2020a. Implicaciones del clima en la calidad de la materia prima caña de azúcar. *Boletín Agroclimático (Costa Rica)* 2(1):5-12.
- Chaves Solera, M. 2020b. Clima, quema y cosecha de la caña de azúcar en Costa Rica. *Boletín Agroclimático (Costa Rica)* 2(3):5-11.
- Chaves Solera, M. 2019a. Entornos y condiciones edafoclimáticas potenciales para la producción de caña de azúcar orgánica en Costa Rica. *In Seminario Internacional: Técnicas y normativas para producción, elaboración, certificación y comercialización de azúcar orgánica.* (1, 2019, Guanacaste, Costa Rica). Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI). 114 p.
- Chaves Solera, M. 2019b. Clima, cosecha de caña y fabricación de azúcar en Costa Rica. *Boletín Agroclimático (Costa Rica)* 1(19):5-10.
- Chaves Solera, M. 2019c. Clima y ciclo vegetativo de la caña de azúcar. *Boletín Agroclimático (Costa Rica)* 1(7):5-6.
- Chaves Solera, M. 2018a. Genética aplicada a la mejora de las plantaciones comerciales de caña de azúcar. *In Congreso Tecnológico DIECA* (7, 2018, San Carlos, Alajuela, Costa Rica). Memoria digital. San José, Costa Rica. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). 43 p.
- Chaves Solera, M. 2018b. Variedades de caña de azúcar sembradas comercialmente en la Zona Atlántica (Turrialba-Juan Viñas), Costa Rica, durante el periodo 1986-2016 (30 años). San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 27 p.
- Chaves Solera, M. 2017. Suelos, nutrición y fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica. *In Seminario internacional producción y optimización de la sacarosa en el proceso agroindustrial* (1, 2017, Puntarenas, Costa Rica). Memoria digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI). 38 p.
- Chaves Solera, M; Bermúdez Loria A. 2006a. Motivos y razones para quemar las plantaciones de caña de azúcar en Costa Rica. *Revista PROCAÑA, Asociación de Productores de Caña de Azúcar de El Salvador.* 13:34-36.
- Chaves Solera, M; Bermúdez Loria, A. 2006b. Consideraciones para la quema tecnificada de una plantación comercial de caña de azúcar en Costa Rica. *In Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI),* (16, 2006, Heredia, Costa Rica). Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI). p. 254-260.
- Chaves Solera, M. 1999. El nitrógeno, fósforo y potasio en la caña de azúcar. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, setiembre. 130 p.
- Department of Environment and Heritage Protection. 2016. Farming in Reef Catchments. The method for soil sampling and analysis for sugarcane properties regulated under the Environmental Protection Act, 1994. 15p.
- DiRienzo, J; Casanoves, F; Balzarini, M; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo, C. 2018. InfoStat versión 2018, Grupo InfoStat, FCA (en línea, programa informático). Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Consultado. 14. ene. 2020. Disponible en <http://www.infostat.com.ar>
- Franzluebbers, A. 2010. Achieving soil organic carbon Sequestration with conservation agricultural systems in the Southeastern United States. *Soil Science Society of America Journal* 74(2):347-357.
- Galdos, M; Cerri, C; Cerri, C. 2009. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma* 153(3-4):347-352.
- Guo, L; Gifford, R. 2002. Soil carbon stocks and land use change. *Global Change Biology* 8:345-360.
- Hernández, I; López, D. 2002. Pérdida de nutrientes por la quema de la vegetación en una sabana de *Trachypogon*. *Revista de Biología Tropical* 50(3-4):1013-1019.

- Holdridge, L. 2000. Ecología basada en zonas de vida, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, San José, Costa Rica. 96 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate change). 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan.
- Jobbagy, E; Jackson, R. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10(2):423-436.
- Karlsson, T. 2013. Soil carbon, pH and yield development in a long-term humus balance trial. Master's Thesis in Soil Science. Agriculture Programme – Soil and Plant Sciences. Swedish University of Agricultural Sciences. 48 p.
- Kemmitt, S; Wright, D; Goulding, K; Jones, D. 2005. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry* 38(5):898-911.
- Kirk, G; Bellamy, P; Murray, R. 2010. Changes in soil pH across England and Wales in response to decreased acid deposition. *Global Change Biology* 16(11):3111-3119.
- La Scala, N; Bolonhezi, D; Pereira, G. 2006. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. *Soil and Tillage Research* 91:244-248.
- La Scala, N; De Figueiredo, E; Panosso, A. 2012. A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. *Brazilian Journal of Biology* 72(3):775-785.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123(1-2):1-22.
- Lal, R. 2008. Soil carbon stocks under present and future climate with specific reference to European ecoregions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 81:113-127.
- Livestock Environmental Assessment and Performance. 2018. Guidelines for measuring soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems. FAO, Rome. 144 p.
- Luo, Z; Wang, E; Sun, O. 2010. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: a review and synthesis. *Geoderma* 155:211-223.
- Rasche, J; Schaefer, G; Drescher, G; Muller, E, Cabral, C; Gómez, V. 2014. Fertilización nitrogenada y su efecto en la productividad y el ataque del taladrador de la caña en dos variedades de caña de azúcar. *Investigación Agraria* 16(1):1-10.
- Robertson, A; Thorburn, P. 2007. Management of sugarcane harvest residues: consequences for soil carbon and nitrogen. *Australian Journal of Soil Research* 45(1):13-23.
- Rumpel, C; Koegel-Knabner, I. 2011. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil* 338(1-2):143-158.
- Rumpel, C; Kogel-Knabner, I; Bruhn, F. 2002. Vertical distribution, age, and chemical composition of organic carbon in two forest soils of different pedogenesis. *Organic Geochemistry* 33(10):1131-1142.
- Sandhu, H; Gilbert, R; Kingston, G; Subiros, J; Morgan, K; Rice, R; Baucum, L; Shine Jr, J; Davis, L. 2013. Effects of sugarcane harvest method on microclimate in Florida and Costa Rica. *Agricultural and Forest Meteorology* 177:101-109.
- Schöning, I; Kögel-Knabner, I. 2006. Chemical composition of young and old carbon pools throughout Cambisol and Luvisol profiles under forests. *Soil Biology and Biochemistry* 38(8):2411-2424.
- Selim, H; Newman, A; Zhang, L; Arceneaux, A; Tubaña, B; Gaston, L. 2016. Distributions of organic carbon and related parameters in a Louisiana sugarcane soil. *Soil and Tillage Research* 155:401-411.
- Six, J; Feller, C; Denef, K; Ogle, S; De Moraes, J; Albrecht, A. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – effects of no-tillage. *Agronomie* 22:755–775.
- Skjemstad, J; Taylor, J; Janik, L; Marvanek, S. 1999. Soil organic carbon dynamics under long-term sugarcane monoculture. *Australian Journal of Soil Research* 37(1):151-164.

Sornpoon, W; Bonnet, S; Garivait, S. 2013. Effect of open burning on soil carbon stock in sugarcane plantation in Thailand. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering* 7(11):775-779.

Tenelli, S; de Oliveira, R; Carneiro, L; Nunes, J. 2019. Can reduced tillage sustain sugarcane yield and soil carbon if straw is removed? *BioEnergy Research* 12:764-777.

West, T; Post, W. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Science Society of America Journal* 66(6):1930-1946.