

IMPACTO SOBRE EL AMBIENTE DEL MONOCULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR CON EL USO DE LA QUEMA PARA LA COSECHA Y LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA. I. BALANCE DEL CARBONO

J. A. Cabrera[✉] y R. Zuaznábar

ABSTRACT. Sugarcane monoculture with pre-harvest burning is a common practice in sugarcane-growing countries causing environmental degradation. In this regard, an investigation was carried out for 27 years, with the objective of defining the behavior of C content and balance in a sugarcane agro-ecosystem where burning is applied to harvesting. A long-term N level trial was conducted under unirrigated conditions, with four planting cycles and 24 harvests. An eutric typical Red Ferralitic soil was used. Soil samples (0.00-0.30 m) were taken from each plot before planting and after some harvestings, besides determining its organic matter through Walkley & Black's method. Soil organic C variation in time was fitted by means of $C_{org} = a + bt^{1/2}$ equation. The total C input quantity per treatment was calculated according to the whole amount of above-ground biomass expressed in dry matter and C %. The entire C emitted to the atmosphere was estimated by taking into account soil organic C output and C emitted by dry leaf burning effect. The final C balance in the agro-ecosystem was calculated by adding to the total C released to the atmosphere the one that was exported with stalks from the field and subtracting the resulting annual C captured per treatment. Soil organic C decreased, even without applying mineral fertilizers (2.05 to 1.43 %). The applied N had no effect on soil organic C decrement. The total C lost from sugarcane agro-ecosystem, considering the one exported by stalks, was similar to that captured by the above-ground biomass; therefore, net balance tended to zero. As C fixed by sugarcane roots and stubble was not considered to estimate C balance, the net balance was positive towards the capture. In spite of the fact that soil fertility proved to be injured, the atmosphere was not contaminated by C concentration increment.

Key words: sugarcane, monoculture, burning, agroecosystems, pollution, carbon, nitrogen fertilizers, soil fertility

RESUMEN. El monocultivo con caña de azúcar y uso de la quema para la cosecha es una práctica común en los países cañeros, que ocasiona la degradación ambiental. Sobre esta base se realizó una investigación durante 27 años, con el objetivo de definir el comportamiento del contenido y balance del C en un agroecosistema cañero donde se practica la quema para la cosecha. Se condujo un experimento de niveles de N de larga duración en condiciones de secano, con cuatro ciclos de plantación y 24 cosechas. Se empleó un suelo Ferralítico Rojo típico éutrico. Antes de la plantación y después de algunas cosechas, se tomaron muestras de suelo (0.00-0.30 m) en cada parcela y se les determinó la materia orgánica por el método de Walkley y Black. La variación del C orgánico del suelo en el tiempo se modeló mediante la ecuación $C_{org} = a + bt^{1/2}$. La cantidad de C capturado anualmente por tratamiento se calculó sobre la base de la cantidad total de biomasa aérea expresada en base seca y % C en la biomasa. La estimación del C total liberado a la atmósfera se realizó considerando la pérdida de C orgánico del suelo y el emitido por efecto de la quema de hojas secas. El balance final del C en el agroecosistema se calculó sumándole al total emitido a la atmósfera el que se exportó del campo con los tallos y restando el resultado del C capturado anualmente por tratamiento. El C orgánico del suelo disminuyó aún sin aplicar fertilizantes minerales (2.05 a 1.43 %). No se encontró efecto del N aplicado sobre la disminución del C orgánico del suelo. El C total perdido del agroecosistema cañero, considerando el exportado por los tallos, resultó similar al capturado por la biomasa aérea, por lo que el balance neto tendió a cero. Como que en la estimación no se tuvo en cuenta el C fijado por las raíces y la cepa de la caña de azúcar, puede pensarse que el balance neto fue positivo hacia la captura. No obstante, se demostró que si bien no se manifestó contaminación atmosférica por el incremento de la concentración de C, sí se deterioró la fertilidad del suelo.

Palabras clave: caña de azúcar, monocultivo, quema, agroecosistemas, polución, carbono, abonos nitrogenados, fertilidad del suelo

Dr.C. J. A. Cabrera, Investigador Titular del departamento de Biofertilizantes y Nutrición de las Plantas, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), gaveta postal 1, San José de las Lajas, La Habana, CP 32 700 y Ms.C. R. Zuaznábar, Investigador Auxiliar y Director de la ETICA-Habana, Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA), Boyeros, La Habana, Cuba

✉ nani@inca.edu.cu

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar, que fisiológicamente es del tipo C_4 , se caracteriza por ser de las plantas que fijan grandes cantidades de $C-CO_2$ de la atmósfera para realizar su función fotosintética. Este C, después de ser fijado en la planta,

puede ser almacenado como C orgánico por la conversión de los residuos agrícolas en materia orgánica del suelo, componente este último que actúa como fuente y sumidero del CO₂ atmosférico (1), o por la acción de microorganismos, destacándose en este sentido los hongos micorrízicos arbusculares, que toman rápidamente el C de la planta y lo fijan al suelo.

Cuando se fomenta un agroecosistema cañero después de la remoción de un área boscosa, el suelo tiene un contenido de materia orgánica que oscila entre 6 y 10% y con posterioridad comienza una disminución, hasta alcanzar cierta estabilización a valores entre 3 y 4 % en condiciones de cultivo manual, y sin el uso de la quema para realizar la cosecha; pero cuando se aplica la quema y requema de los residuos agrícolas o la cosecha se realiza de forma mecanizada, ocurren modificaciones de las propiedades del suelo, manifestadas en la disminución de la materia orgánica y el aumento de la compactación entre otras, lo que constituye, y actualmente se conoce, como cambios globales en los suelos (2, 3).

La agricultura extensiva se estableció en Cuba con la caña de azúcar desde el siglo pasado. Al implementar la quema para realizar la cosecha y el uso excesivo del laboreo, se iniciaron actividades que se consideran poco conservacionistas por los efectos adversos que ocasionan (4), entre los que se encuentran la disminución del C orgánico del suelo y su emisión hacia la atmósfera.

La quema antes de la cosecha de la caña de azúcar y posterior requema son prácticas muy extendidas en los trópicos, que se usan para la eliminación de la cobertura vegetal, el control de malezas, la disminución del material seco y reducción de los costos de cosecha, así como para eliminar los residuos sobrantes y acelerar la preparación del suelo y replantación, pero ocasionan la destrucción de materia orgánica y pérdida de la estructura del suelo por un mayor desecamiento y erosión, especialmente en tierras con pendiente (5).

La extracción y exportación de nutrientes, y la pérdida continua de materia orgánica que sufre el suelo, que conlleva a que este se empobrezca continuamente, son entre otras causas las que provocan que el rendimiento agrícola del cultivo disminuya considerablemente con el transcurso de los años (6).

Estudios realizados con experimentos de larga duración en la red experimental del Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA), demostraron que el monocultivo de la caña de azúcar contribuye a la degradación paulatina del suelo, con una disminución acentuada en el contenido de materia orgánica debido fundamentalmente a métodos inadecuados de manejo, acentuándose progresivamente cuando se elimina la lámina de residuos de cosecha dejada en el campo por la quema u otras prácticas culturales (7).

Por otro lado, no usar la quema proporciona ventajas ambientales que tienen que considerarse. En este sentido, se ha destacado que entre los principales beneficios de adoptar la cosecha de caña de azúcar sin la quema,

manteniendo una cobertura con los residuos agrícolas, están la reducción del uso de herbicidas preemergentes, el laboreo y la erosión, así como la conservación de la humedad del suelo (8).

Otros concluyeron que el suelo del entresurco de la caña donde se quema recibe pocas entradas de materia orgánica y la conversión a una cosecha de caña verde con la retención de los residuos agrícolas mejora el contenido de materia orgánica y las propiedades microbiológicas y físicas del suelo del entresurco (9).

Si bien existe consenso sobre las ventajas y desventajas que trae aparejado el uso de la quema para la cosecha, no abundan referencias donde se aprecien estimaciones del balance de C en los agroecosistemas cañeros.

Según se ha informado con los resultados de las investigaciones, la quema de 1 ha de caña de azúcar libera a la atmósfera 6.6 Mg de C al año, equivalente a 24.3 Mg de CO₂, planteándose, además, que esta última cifra, comparada con la capacidad de fijación de CO₂ por este cultivo, no resulta significativa, ya que 1 ha de caña de azúcar con alta tasa de crecimiento es capaz de secuestrar 80 Mg de CO₂ anualmente, lo que equivale a 21.7 Mg.año⁻¹ de C (10).

La carencia de información sobre la estimación del balance de C en los agroecosistemas cañeros y tomando en consideración que, desde el punto de vista ambiental, cuantificar la emisión de C hacia la atmósfera por las distintas actividades que el hombre realiza permite conocer su efecto en el calentamiento global y su incidencia en el cambio climático, obligan a realizar estudios sobre la dinámica y el balance de C en agroecosistemas monocultivos con caña de azúcar, en los que se usa la quema para la cosecha, lo que constituye el objetivo central de este trabajo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos se desarrollaron en la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (EPICA) de La Habana, en la Empresa Azucarera Héctor Molina, municipio de San Nicolás de Bari, provincia La Habana, que se encuentra situado, según el Sistema de Coordenadas Cuba Norte, entre los 318500-332500 N y 397500-418500 E (Figura 1) y a 20.3 m snm.

La zona se caracteriza por un clima tropical subhúmedo, con precipitaciones que alcanzan los mayores valores entre mayo y octubre, en que la ocurrencia se corresponde con el 80 % de la media anual y el período poco lluvioso está comprendido entre noviembre y abril (Figura 2).

Otras variables del clima de la zona aparecen en la Tabla I, confeccionada con los datos de la Estación Meteorológica de Güines y de la propia Estación Experimental.

La investigación comprendió un experimento de larga duración con cultivo continuado de caña de azúcar, en condiciones de secano (temporal) y con el uso de la quema para la cosecha, donde se evaluaron cuatro ciclos de plantación. Las claves de los experimentos en cada ciclo fueron HF-22 (primer ciclo de cosecha), HF-42 (segundo ciclo) y HNN-2 (tercer y cuarto ciclos).

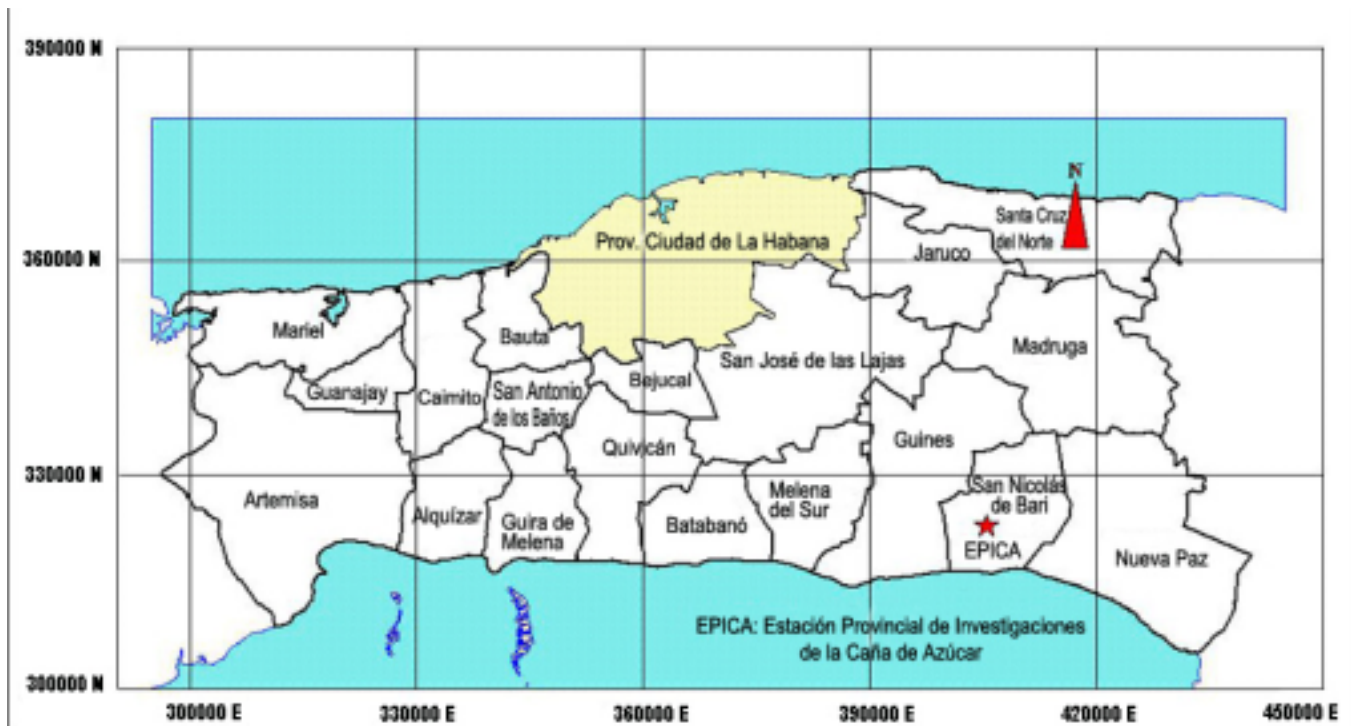


Figura 1. Mapa de la provincia La Habana con la ubicación de la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar

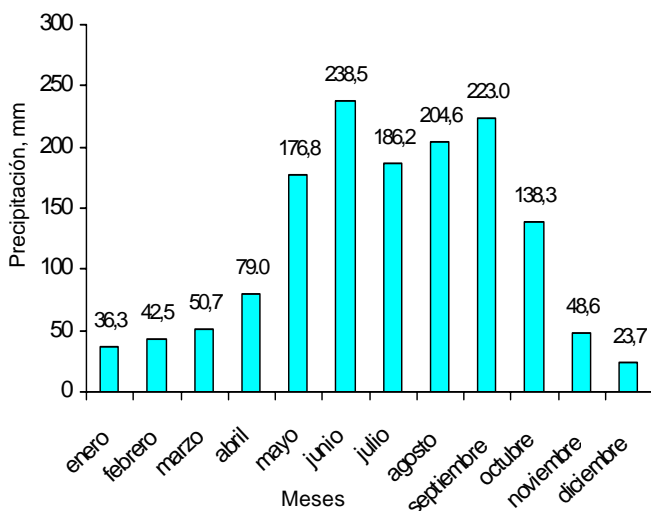


Figura 2. Distribución por meses de la lluvia promedio histórica en San Nicolás de Bari en el período comprendido entre 1927 y 2007

El estudio, con una duración de 27 años, comenzó el 27 de marzo de 1973 y concluyó el 26 de mayo del 2000. En la Tabla II se presentan los años en que se plantaron y cosecharon los diferentes ciclos de plantación.

El suelo donde se desarrolló el estudio es Ferralítico Rojo típico éutrico, según la Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (11), correspondiéndose con un Nitisol ferrálico (éutrico, ródico) de la Clasificación del *World Reference Base* (12).

Las siguientes variedades de caña de azúcar fueron evaluadas en los ciclos:

- ⊕ Primero: B 4362
- ⊕ Segundo: Ja 60-5
- ⊕ Tercero: Ja 60-5
- ⊕ Cuarto: C 323-68

La reposición de las plantaciones se realizó de forma tal, que los tratamientos evaluados quedarán siempre ubicados en la misma parcela, lo que permitió estudiar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre el suelo, cultivo y agroecosistema en el tiempo. Se propiciaron condiciones favorables al cultivo, manteniéndose libre de malas hierbas mediante las labores de cultivo mecanizado, limpiezas manuales y aplicaciones de herbicidas de pre y pos-emergencia.

De los 10 tratamientos ensayados en los ciclos de cosecha, solo se referirán los resultados donde no se aplicó fertilizante nitrogenado (tratamientos 1 y 2) y aquellos en los que se aplicaron las dosis: baja (tratamiento 3), media (tratamiento 5) y alta (tratamiento 9) para las condiciones de Cuba (Tabla III).

Los tratamientos se distribuyeron en un diseño de bloques al azar con cuatro réplicas, en parcelas de 48 m², con cuatro surcos de 7.50 m de longitud y espaciados a 1.60 m.

Las cosechas se realizaron mediante corte manual en caña quemada, procediéndose al pesaje directo en el campo de la producción de cada parcela, estimándose así la variable rendimiento (Mg.ha⁻¹ de tallos) para su posterior análisis estadístico.

Tabla I. Datos climáticos promedio por meses y la media anual prevaeciente en San Nicolás de Bari en el período comprendido entre 1927 y 2007

| Mes | Temperatura del aire (°C) | Humedad relativa (%) | Velocidad del viento (km.h ⁻¹) | Radiación solar (MJ.m ⁻² .día ⁻¹) | Evapotranspiración de referencia (mm.día ⁻¹) |
|------------|---------------------------|----------------------|--|--|--|
| Enero | 23.1 | 74.90 | 164 | 7.6 | 1.91 |
| Febrero | 20.1 | 76.57 | 190 | 9.3 | 2.53 |
| Marzo | 23.9 | 75.37 | 199 | 11.5 | 1.70 |
| Abril | 25.1 | 74.75 | 190 | 13.7 | 2.57 |
| Mayo | 26.7 | 77.83 | 173 | 13.4 | 2.37 |
| Junio | 27.7 | 81.50 | 147 | 12.8 | 1.73 |
| Julio | 28.2 | 80.43 | 147 | 13.3 | 1.94 |
| Agosto | 28.3 | 80.32 | 130 | 13.1 | 2.35 |
| Septiembre | 28.0 | 82.34 | 130 | 12.2 | 1.59 |
| Octubre | 26.7 | 80.82 | 138 | 10.5 | 0.60 |
| Noviembre | 25.2 | 80.45 | 164 | 8.3 | 0.57 |
| Diciembre | 21.9 | 78.77 | 164 | 7.1 | 2.46 |
| Anual | 25.41 | 78.67 | 161 | 11.1 | 22.32 |

Tabla II. Fechas de plantación y cosecha de la caña de azúcar en los diferentes ciclos evaluados en un experimento de larga duración desarrollado en San Nicolás de Bari

| Ciclos | Fecha de plantación | Planta | Fecha de cosecha | | | | | |
|-----------------|---------------------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | 1 ^{er} retoño | 2 ^{do} retoño | 3 ^{er} retoño | 4 ^{to} retoño | 5 ^{to} retoño | 6 ^{to} retoño |
| 1 ^{ro} | 27-3-73 | 5-1-75 | 8-2-76 | 23-2-77 | 4-3-78 | 29-3-79 | 12-4-80 | |
| 2 ^{do} | 5-6-80 | 10-1-82 | 19-2-83 | 27-2-84 | 11-3-85 | 28-3-86 | 15-4-87 | |
| 3 ^{ro} | 20-6-87 | 18-1-89 | 23-1-90 | 22-1-91 | 17-2-92 | 26-2-93 | 11-3-94 | 2-4-95 |
| 4 ^{to} | 20-4-95 | 25-4-96 | 30-4-97 | 9-5-98 | 17-5-99 | 26-5-00 | | |

Tabla III. Descripción de los tratamientos evaluados en el experimento de larga duración desarrollado en San Nicolás de Bari donde se estudió al N como nutriente

| Tratamientos | Dosis (kg.ha ⁻¹) | | |
|--------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|
| | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 90 | 100 |
| 3 | 40 | 90 | 100 |
| 5 | 80 | 90 | 100 |
| 9 | 160 | 90 | 100 |

Antes de la plantación de los experimentos y después de cada cosecha, se realizaron muestreos de suelo, tomándose con barrena una muestra compuesta por parcela del horizonte cultivable del suelo (0.00-0.30 m de profundidad). Cada muestra compuesta estuvo conformada por ocho submuestras, cuatro del camellón y cuatro del entresurco. Las muestras fueron secadas al aire, posteriormente molidas y tamizadas por una malla de 1 mm para la realización de los análisis de laboratorio. A las muestras de suelo se les determinó la materia orgánica por el método de Walkley y Black.

El contenido de materia orgánica del suelo se expresó en C orgánico fácilmente mineralizable, dividiéndolo por el factor 1.724. La variación del C orgánico del suelo en el tiempo se modeló mediante una ecuación de la forma:

$$C_{org} = a + bt^{1/2} \quad (i)$$

donde:

C : C orgánico en un tiempo "t", %

t: Tiempo transcurrido desde el muestreo inicial, años

a: Intercepto o C orgánico inicial del suelo, %

b: Coeficiente de regresión de la curva

Las ecuaciones se linealizaron y los datos experimentales se ajustaron por el método de los mínimos cuadrados. Se calcularon el índice de determinación (R²) y error estándar de la estimación (Es y).

La disminución del C_{org} se determinó restando al contenido de C para t= 0, el contenido correspondiente para t=21 años.

Para calcular la emisión de C hacia la atmósfera, producida por la quema de la caña de azúcar, se estimó la producción de residuos agrícolas, estableciendo índices a partir de la información obtenida para las condiciones de Cuba para suelos Ferralíticos Rojos (13):

- ☒ La masa seca de la biomasa aérea de la caña planta es 31 %
- ☒ La masa seca de la biomasa aérea de los retoños es 34 %
- ☒ La relación [masa de hojas verdes/masa de tallos] para caña planta es 0.1293
- ☒ La relación [masa de hojas verdes/masa de tallos] en los retoños es 0.0916
- ☒ La relación [masa de hojas secas/masa de tallos] para caña planta es 0.2485
- ☒ La relación [masa de hojas secas/masa de tallos] en los retoños es 0.3537

- ✧ El contenido de C de los tallos es 50 %
- ✧ El contenido de C de las hojas es 43 %

Se calculó la cantidad de C capturado anualmente por tratamiento sobre la base de la cantidad total de biomasa aérea estimada expresada en base seca y el porcentaje de C en la biomasa:

$$C_{sec} = B_{aérea} (BS) \times C_{biomas} \quad (ii)$$

Donde:

C_{sec} : C secuestrado, Mg.ha⁻¹

$B_{aérea}$: Biomasa aérea total estimada en base seca, incluidos los tallos, Mg.ha⁻¹

C_{biomas} : Contenido de C en la biomasa aérea, %

Para estimar la emisión de C de los residuos agrícolas hacia la atmósfera por efecto de la quema, se asumieron los siguientes criterios:

- ◆ cuando se quema queda en el campo el 10 % del C (14)
- ◆ solo se consideró la combustión de las hojas secas

De tal manera que la estimación se realizó de la siguiente forma:

$$C_{emi} = C_{sec/HS} \times 0.9 \quad (iii)$$

Donde:

C_{emi} : C emitido a la atmósfera por la quema de las hojas secas, Mg.ha⁻¹

$C_{sec/HS}$: C secuestrado o fijado por las hojas secas, Mg.ha⁻¹

0.9: Factor por considerar que se emite el 90 % del C fijado o secuestrado

La estimación del C total emitido a la atmósfera se realizó considerando la pérdida de C orgánico del suelo y el emitido por efecto de la quema de las hojas secas:

$$C_{emiT} = C_{emi} + (C_o - C_{org}) \quad (iv)$$

Donde

C_{emiT} : C total emitido del agroecosistema, Mg.ha⁻¹

C_{emi} : Igual significado que en la ecuación (iii)

C_o : Tiene el significado de la ecuación (i)

C_{org} : C inicial del suelo, %

Se calculó el balance final del flujo de C en el agroecosistema sumándole a C_{emiT} el C que se exporta con los tallos que van a la industria; después el resultado se restó de C_{sec} .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variación del C orgánico en el suelo. El porcentaje inicial de C orgánico en el suelo antes de la plantación alcanzó valores superiores al 2 % y en el último muestreo de suelo realizado a los 21 años, el contenido estuvo por debajo de 1.50 % (Figuras 3 y 4).

Mientras que la media de C orgánico para el horizonte superficial de diferentes tipos de suelos de Cuba fue 1.88 % (15), para los suelos Ferralíticos Rojos típicos se ha informado un contenido medio de materia orgánica de 3.28±0.12 % (16), equivalente a 1.90±0.07 % de C orgánico, por lo que el valor inicial encontrado en este estudio se encontró dentro del rango correspondiente a este tipo de suelo.

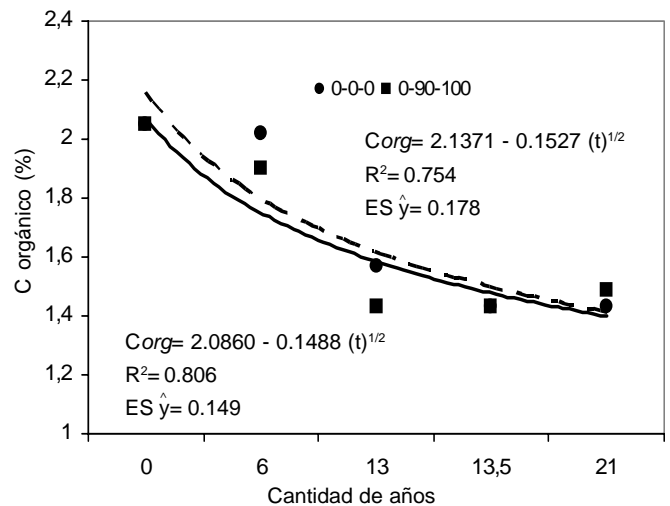


Figura 3. Variación del C orgánico del suelo Ferralítico Rojo típico en el tiempo sin aplicar fertilizantes minerales y con la aplicación de P y K y quemando la caña para la cosecha

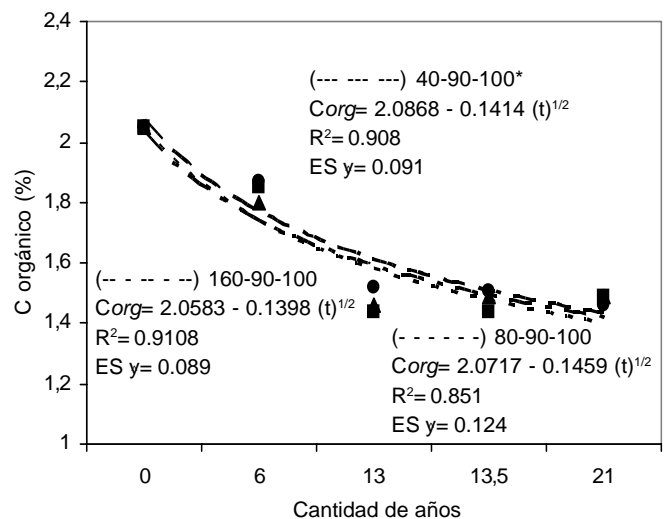


Figura 4. Variación del C orgánico del suelo Ferralítico Rojo típico en el tiempo con la aplicación de fertilizantes minerales y quemando la caña para la cosecha

En el primer ciclo de cosechas (los primeros seis años), apenas el C orgánico del suelo disminuyó, a pesar de usar la quema para las cosechas, variando entre 2.05 y 1.94 % (Figura 3).

En el segundo ciclo (entre 6 y 13 años) se apreció una disminución manifiesta del C orgánico del suelo y a partir de los 13 años, dicho contenido se mantuvo prácticamente invariable. Esto último se puede interpretar como que el suelo alcanzó un equilibrio entre la incorporación de materia orgánica proveniente del sistema radical, la cepa y los restos de cosecha de la caña de azúcar que no se queman, así como la mineralización y pérdida en el agroecosistema por efecto del manejo dado a las plantaciones, dentro del que se encuentra el uso de la quema para la realización de las cosechas.

Un comportamiento similar se obtuvo en aquellas parcelas en que se aplicaron fertilizantes minerales (Figura 4), con la diferencia de que en los primeros seis años sí ocurrió un descenso del C orgánico del suelo hasta valores de 1.80-1.87 %.

Los coeficientes de regresión de las curvas representadas en las figuras antes mencionadas están precedidos por un signo menos, por lo que asumiendo que el contenido de C orgánico inicial del suelo o intercepto de las curvas sean iguales, se interpreta que en los tratamientos donde se realizó la fertilización mineral completa, el contenido de C orgánico es mayor para un tiempo "t" dado que en aquellos en los que no se fertilizó o la fertilización nitrogenada estuvo ausente, lo que puede atribuirse a la mayor formación de biomasa y residuos agrícolas en los primeros, que aportaron materia orgánica que se incorporó al suelo. La pérdida de C orgánico del suelo en 21 años se presenta en la Tabla IV.

Tabla IV. Pérdida de C orgánico fácilmente mineralizable del suelo Ferralítico Rojo típico monocultivado con caña de azúcar durante 21 años y el uso de la quema para la cosecha

| N-P ₂ O ₅ -K ₂ O (kg.ha ⁻¹) | Contenido de C orgánico del suelo | | | Pérdida Mg.ha ⁻¹ |
|---|-----------------------------------|--------------|------------------------|--------------------------------|
| | Inicial (1973) | Final (1994) | Pérdida -----%----- | |
| 0-0-0 | 2.05 | 1.43 | 0.62 | 18.78 |
| 0-90-100 | 2.05 | 1.49 | 0.56 | 16.96 |
| 40-90-100 | 2.05 | 1.46 | 0.59 | 17.87 |
| 80-90-100 | 2.05 | 1.49 | 0.56 | 16.96 |
| 160-90-100 | 2.05 | 1.49 | 0.59 | 17.87 |

Existió poca variabilidad de las emisiones de C orgánico del suelo, a pesar de la diferencia en la fertilización recibida con los tratamientos; aunque sí se manifestó la tendencia de que la disminución en el tiempo fuera menor cuando se aplicó fertilizante mineral. No se encontró efecto del N aplicado sobre la disminución del C orgánico del suelo. Con anterioridad se había encontrado poco efecto de la fertilización nitrogenada en un agroecosistema basado en maíz irrigado (17).

El hecho de que el contenido de C orgánico del suelo haya disminuido cuando no se aplicó fertilizante mineral y que el N aplicado no influyó sobre este comportamiento, permite pensar que el monocultivo y uso de la quema para la cosecha tuvo un efecto importante, lo que no se pudo mitigar con la fertilización, que hizo incrementar los rendimientos y, por consiguiente, la producción de residuos agrícolas, algunos de los cuales no fueron quemados, como las hojas verdes o cogollo y tallos inmaduros o no molibles, que constituyeron fuentes de entrada de C orgánico al agroecosistema.

Está demostrado que con el monocultivo se limita la posibilidad de acumular mayores cantidades de residuos de distinta calidad, que representan aportes significativos de C para el suelo (18) y que una de las formas de fomentar la fertilidad del suelo es manteniendo estable el contenido de materia orgánica, aspecto que no se logra con el monocultivo (7).

Respecto a la fertilización, se han encontrado resultados aplicando fertilizantes minerales y orgánicos, que demuestran que los valores medio de materia orgánica en el suelo disminuyen con los años de cultivo continuado, independientemente de los regímenes de fertilización que se utilicen (6).

Los resultados correspondientes a la evolución del contenido de materia orgánica del suelo durante 20 años de cultivo continuado con caña de azúcar muestran que de un valor inicial de 3.89 % (2.25 % C), que se clasifica como medio, descendió hasta 2.78 % (1.61 % C), evaluado como bajo, donde la disminución en 1.11 % (0.64 % C) resultó una reducción significativa (19). En este sentido, es interesante destacar que con un año menos de evaluación por los autores citados, la disminución del C orgánico del suelo resultó ligeramente superior al alcanzado en la presente investigación, lo que puede deberse a la obtención de mayores rendimientos de campo en esta última, que manteniéndose una relación constante de producción de residuos agrícolas con respecto al rendimiento, tal como se ha encontrado (20), entonces la producción de los residuos mencionados sería mayor y la posibilidad de incorporación de C orgánico se vería favorecida.

Captura y emisión de C por la biomasa aérea de la caña de azúcar. Con la quema para la cosecha se elimina una parte de los residuos del cultivo y los microorganismos que la descomponen, por lo que los aportes de C orgánico se reducen drásticamente por el empleo de estas prácticas en el tiempo (21).

Al quemar para la cosecha, una parte de la biomasa de la caña de azúcar se mineraliza, proceso mediante el cual se emite C hacia la atmósfera; pero esta es menor que aquella que fue capturada durante el crecimiento y desarrollo de la plantación, lo que motiva que el balance del C por concepto de biomasa sea positivo (Tabla V).

La fertilización con N incrementó el secuestro o la captura del C y, a la vez, propició una mayor emisión hacia la atmósfera; no obstante, en el agroecosistema el ingreso de C fue mayor que la emisión, lo que está motivado por el incremento de los rendimientos, tanto de tallos como de los residuos agrícolas, por efecto del N aplicado con el fertilizante.

Tomando en consideración el C orgánico que sale del suelo (Tabla IV) y aquel que se emite a la atmósfera por la quema en la cosecha (Tabla V), se estimó que el C perdido del agroecosistema anualmente, sin considerar el C exportado por los tallos, varió entre 4.27 y 5.56 Mg.ha⁻¹.año⁻¹ de C (Tabla VI), correspondiéndole el mayor valor absoluto al tratamiento que incluyó la aplicación de la dosis mayor de N.

Al sumar a la pérdida anual de C, el que se exporta con los tallos al ser llevados a la industria, la salida de C del agroecosistema se incrementa considerablemente (Tabla VII).

Tabla V. Balance del C de la biomasa aérea de la caña de azúcar cuando se queman los residuos agrícolas en el suelo Ferralítico Rojo típico. Segundo ciclo de cosechas con una duración de seis años

| Ciclo | Flujo de C | N-P ₂ O ₅ -K ₂ O, kg.ha ⁻¹ | | | | |
|------------------------|------------|--|----------|-----------|-----------|------------|
| | | 0-0-0 | 0-90-100 | 40-90-100 | 80-90-100 | 160-90-100 |
| | | -----C, Mg.ha ⁻¹ ----- | | | | |
| Planta | Captura | 23.21 | 21.53 | 27.38 | 26.31 | 23.96 |
| | Emisión | 3.37 | 3.13 | 3.97 | 3.82 | 3.48 |
| | Balance | +19.84 | +18.40 | +23.41 | +22.49 | +20.48 |
| 1 ^{er} retoño | Captura | 23.14 | 22.66 | 24.85 | 24.14 | 25.42 |
| | Emisión | 4.58 | 4.49 | 4.92 | 4.78 | 5.03 |
| | Balance | +18.56 | +18.17 | +19.93 | +19.36 | +20.39 |
| 2 ^{do} retoño | Captura | 25.93 | 21.43 | 25.04 | 25.90 | 32.33 |
| | Emisión | 5.13 | 4.24 | 4.96 | 5.13 | 6.40 |
| | Balance | +20.80 | +17.19 | +20.08 | +20.77 | +25.93 |
| 3 ^{er} retoño | Captura | 19.91 | 17.19 | 24.00 | 24.82 | 31.03 |
| | Emisión | 3.94 | 3.40 | 4.75 | 4.91 | 6.14 |
| | Balance | +15.97 | +13.79 | +19.25 | +19.91 | +24.89 |
| 4 ^{to} retoño | Captura | 14.97 | 13.39 | 15.75 | 15.18 | 18.12 |
| | Emisión | 2.96 | 2.65 | 3.12 | 3.01 | 3.59 |
| | Balance | +12.01 | +10.74 | +12.63 | +12.17 | +14.53 |
| 5 ^{to} retoño | Captura | 14.63 | 14.58 | 18.30 | 18.05 | 18.49 |
| | Emisión | 2.90 | 2.89 | 3.62 | 3.57 | 3.66 |
| | Balance | +11.73 | +11.69 | +14.68 | +14.48 | +14.83 |
| Total | Captura | 121.79 | 110.78 | 135.32 | 134.4 | 149.35 |
| | Emisión | 22.88 | 20.80 | 25.34 | 25.22 | 28.30 |
| | Balance | +98.91 | +89.98 | +109.98 | +109.18 | +121.05 |

Tabla VI. Pérdida de C orgánico del suelo y la biomasa que se quema para la cosecha de la caña de azúcar en un suelo Ferralítico Rojo típico con 21 años de monocultivo

| N-P ₂ O ₅ -K ₂ O (kg.ha ⁻¹) | Cantidad de C perdido del agroecosistema | | | |
|---|--|-------|--------|----------------|
| | Biomasa residual | Suelo | Total | Promedio anual |
| -----C, Mg.ha ⁻¹ ----- | | | | |
| 0-0-0 | 80.08 | 18.78 | 98.86 | 4.70 |
| 0-90-100 | 72.80 | 16.96 | 89.76 | 4.27 |
| 40-90-100 | 88.69 | 17.87 | 106.56 | 5.07 |
| 80-90-100 | 88.27 | 16.96 | 105.23 | 5.01 |
| 160-90-100 | 99.05 | 17.87 | 116.92 | 5.56 |

Tabla VII. Balance final del flujo de C en el agroecosistema cañero en un suelo Ferralítico Rojo típico donde se quema para la cosecha

| N-P ₂ O ₅ -K ₂ O (kg.ha ⁻¹) | Pérdida anual de C | Captura anual de C | Balance de C | |
|---|---|----------------------|--------------|-------|
| | Fijación en tallos+pérdida ^(a) | Total ^(b) | (b)-(a) | |
| -----C, Mg.ha ⁻¹ .año ⁻¹ ----- | | | | |
| C, % | | | | |
| 0-0-0 | 19.50 | 20.29 | 0.79 | 0.026 |
| 0-90-100 | 17.74 | 18.46 | 0.72 | 0.023 |
| 40-90-100 | 21.52 | 22.55 | 0.98 | 0.032 |
| 80-90-100 | 21.35 | 22.40 | 1.05 | 0.034 |
| 160-90-100 | 23.68 | 24.89 | 1.21 | 0.039 |

^(a) Promedio de pérdida anual según valores de la Tabla VI y fijación de C por los tallos

^(b) Promedio de valores de la captura total de C según Tabla V

A pesar de que el balance anual indica más entrada (captura) que salida (emisión) de C, los valores alcanzados expresados en porcentaje son menores que la precisión de la técnica analítica utilizada para medir el C, lo que sugiere que el balance neto es igual a cero. Sin embargo, como que en la estimación del balance no se tuvo en cuenta el C fijado en las raíces y cepa de la caña de azúcar, se puede interpretar entonces que el balance neto resultó positivo.

Estos resultados indican que si bien no se incidió directamente en la contaminación atmosférica por incrementar la concentración de C, el daño ocasionado al suelo es un elemento a tener en cuenta para la toma de decisiones, en cuanto a las dosis de N a aplicar y eliminar el uso de la quema para la cosecha.

Realizando una estimación global del flujo de C en agroecosistemas cañeros, se ha considerado la posibilidad de existencia de un balance negativo, provocado por la intensidad del fuego y el uso de la requema de los residuos después de trasladar los tallos moleaderos al ingenio (22, 23). Sin embargo, estas estimaciones pueden haber tenido cierto nivel de imprecisión subestimando el valor del secuestro, debido a que se utilizó una captura de C por la caña de azúcar por debajo del valor medio real posible de esta gramínea C4 y tampoco se consideró el C fijado en la cepa y raíces de la planta.

CONCLUSIONES

- ✱ El monocultivo continuado con caña de azúcar utilizando la quema para la cosecha causa la degradación del suelo, mediante la disminución del C orgánico aún sin aplicar fertilizantes minerales.
- ✱ La emisión de C hacia la atmósfera, por efecto de la quema de una parte de la biomasa aérea de la caña de azúcar, es menor que la captura o secuestro de C que realiza esa biomasa, por lo que el balance favorece la captura.
- ✱ La fertilización con N incrementa el secuestro de C por el incremento de los rendimientos y, a la vez, propicia una mayor emisión hacia la atmósfera cuando se usa la quema en la cosecha, por el incremento en la producción de los residuos agrícolas.
- ✱ El C que se pierde del agroecosistema cañero, sin considerar el exportado por los tallos, se hace mayor a medida que se incrementa la fertilización con N.
- ✱ El C total perdido del agroecosistema cañero, considerando el exportado por los tallos llevados a la industria, resulta similar o menor al capturado por la biomasa aérea, por lo que el balance neto tiende a cero o es positivo.
- ✱ Si bien no se incide directamente en la contaminación atmosférica por el incremento de la concentración de C, el daño ocasionado al suelo es un elemento a tener en cuenta para la toma de decisiones en cuanto a eliminar el uso de la quema para la cosecha.

REFERENCIAS

1. Sainju, U. M.; Jabro, J. D. y Stevens, W. B. Soil carbon dioxide emission and carbon content as affected by irrigation, tillage, cropping system, and nitrogen fertilization. *J. Environ. Qual.*, 2008, vol. 37, p. 98-106.
2. Ascanio, M. O. y Hernández, A. Cambios climáticos y degradación de los suelos en los agrosistemas cañeros representativos de México. Énfasis en los estados de Veracruz y Oaxaca. Taller sobre cambio climático y los bonos GEI, para los mecanismos de desarrollo limpio. Área Biológica-Agropecuaria, CEVIM, Xalapa, Veracruz, México. Noviembre 2004.
3. Ascanio M. O. y Hernández, A. Suelos cañeros en Veracruz y Oaxaca, cambios globales y ambiente. México: Editora Univ. Veracruzana. 2006. 285 p.
4. Toledo, E. La cosecha "en verde" y conservación *in situ* de los residuos de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Impacto en la sostenibilidad y restauración del agroecosistema en Huixtla, México. Tesis de Dr. C. Agrícolas, Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agrícolas, Méjico, 100 pp., 2008.
5. Castillo, A.; Milanés, N.; Rodríguez, D. A.; Aguilar, N.; Ordóñez, P. y Lozano, F. Impacto de la quema de caña de azúcar sobre el N en suelos de la región Veracruz Central, México. *Revista Cuba & Caña*, 2007, p. 7-12.
6. Rodríguez, I; Pineda, E.; Fernández, I.; Marresa, M.; Gil, Y.; Rodríguez, L.; Aguilera, L.; Mas, R.; Acosta, F.; García, I.; Sánchez, E.; Díaz, T.; Reyes, M.; González, Y.; Estévez, Y.; Álvarez, R.; Dueñas, M.; Barreto, B.; Becerra, E. y Hernández, N. El cultivo de la caña de azúcar y su influencia sobre algunas propiedades químicas y el rendimiento agrícola de un suelo Pardo sialítico bajo diferentes regímenes de fertilización. Evento por el 60 Aniversario de la EPICA de Jovellanos. Varadero-Matanzas, junio 5 al 9, 2007. ISBN 1021-6527
7. Pablos, P.; León, M. de; Cortegaza, P. L.; Osorio, N. y Villegas, R. Afectación de la materia orgánica del suelo bajo diferentes condiciones de manejo. Evento por el 60 Aniversario de la EPICA de Jovellanos. Varadero-Matanzas, junio 5 al 9, 2007. ISBN 1021-6527
8. Kingston, G.; Donzelli, J. L.; Meyer, J. H.; Richard, E. P.; Seeruttun, S.; Torres, J. y Van Antwerpen, R. Impact of the green-cane harvest production system on the agronomy of sugarcane. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.*, 2005, vol. 15, p. 521-533.
9. Graham, M. H. y Haynes, R. J. Organic matter status and the size, activity and metabolic diversity of the soil microbial community in the row and inter-row of sugarcane under burning and trash retention. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, vol. 38, no. 1, p. 21-31.
10. Salgado, G. S.; Buero, L.; Riestra, D. y Laguries-Espinoza, L. C. Caña de azúcar, hacia un manejo sustentable. Centro de Posgraduados Campus Tabasco, ISPROYAB., Villahermosa: Fundación Produce. 2001. 394 p.
11. Hernández, A.; Ascanio, O.; Morales, M.; Cabrera, A.; Medina, N. Correlación de la Nueva Versión de Clasificación de los Suelos de Cuba con el *World Reference Base* (WRB). En: Hernández, A. y Ascanio, O. (eds.) Problemas actuales de la clasificación de suelos: énfasis en Cuba. México: Universidad Veracruzana, 2004. p. 203-221
12. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007. FAO. World Soil Resources Reports, 2007, no. 103, p. 128.
13. Cabrera, A. Aporte de nutrimentos con los residuos de cosecha en agroecosistemas cañeros. Primer Encuentro Nacional de Agricultura Orgánica. Programa y Resúmenes. La Habana: Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias. 1993. p: 7-8.
14. Crutzen, P. J. y Andreae, M. D. Biomass burning in the tropics: Impacts on atmospheric chemistry and biological cycles. *Sciences*, 1990, vol. 250, p. 1661-1678.
15. Ponce de León, D. Las reservas de C orgánico de los suelos minerales de Cuba. Aporte metodológico al cálculo y generalización espacial. [Tesis de Doctor en Ciencias Agrícolas] La Habana: Universidad Agraria, 2003. 99 p.
16. Cabrera, A. Caracterización agroquímica de los suelos Ferralíticos donde se cultiva la caña de azúcar en Cuba. [Tesis de Doctor en Ciencias Agrícolas] La Habana: Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar, 1991. 101 p.
17. Amos, B.; Arkebauer, T. J. y Doran, J. W. Soil surface fluxes of greenhouse gases in an irrigated maize-based agroecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2005, vol. 69, p. 387-395.
18. García, F. Agricultura sustentable y materia orgánica del suelo. Siembra directa, rotaciones y fertilidad. Ponencia presentada en el III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 2004.

19. Bouzo, L.; Tuero, S. y González, M. Propuesta agroecológica al problema del monocultivo de las áreas cañeras. Evento por el 60 Aniversario de la EPICA de Jovellanos. Varadero-Matanzas, junio 5 al 9, 2007. ISBN 1021-6527
20. Toledo, E.; Cabrera, A.; Leyva, A.; Pohlen, J. Estimación de la producción de residuos agrícolas en agro-sistemas de caña de azúcar. *Cultivos Tropicales*, 2008, vol. 29, no. 3, p. 17-21.
21. Terumim, L.; Assis, L. C.; Ademir de Oliveira, J. y Nahas, E. Mineralización de la paja de caña de azúcar en suelo adicionado con viñaza (subproducto de la industria del alcohol de caña de azúcar) y fertilizante nitrogenado. *Agricultura Técnica*, 2006, vol. 66, no. 1, p. 90-97.
22. Cabrera, A.; López, M. y Villegas, R. Estimado de las emisiones de C por la quema de agroecosistemas cañeros. En: International Symposium on Environmental Biogeochemistry. *Biogeochemistry of Ecosystems* (11:1994: Salamanca, España), 1994. p. 83-90.
23. Cabrera A. Intensive sugarcane cropping: Productivity and environment. 15th World Congress of Soil Science, vol. 7. Acapulco, Gro, México. 1994. p. 342-351.

Recibido: 27 de febrero de 2009

Aceptado: 28 de septiembre de 2009

