



Impacto del manejo de agroecosistemas cafetaleros en la calidad del suelo en las cuatro estaciones del año en Tlapacoyan, Veracruz

Márquez de la Cruz, Jonathan Edilberto; Rodríguez Mendoza, María de las Nieves; García Cué, José Luis; Sánchez Escudero, Julio; Tinoco Rueda, Juan Ángel

Impacto del manejo de agroecosistemas cafetaleros en la calidad del suelo en las cuatro estaciones del año en Tlapacoyan, Veracruz

CIENCIA *ergo-sum*, vol. 29, núm. 2, julio-octubre 2022 | e163

Ciencias Naturales y Agropecuarias

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Márquez de la Cruz, J. E, Rodríguez Mendoza, M. de las N., García Cué, J. L., Sánchez Escudero, J. y Tinoco Rueda, J. Á. (2022). Impacto del manejo de agroecosistemas cafetaleros en la calidad del suelo en las cuatro estaciones del año en Tlapacoyan, Veracruz. *CIENCIA ergo-sum*, 29(2). <http://doi.org/10.30878/ces.v29n2a8>

Impacto del manejo de agroecosistemas cafetaleros en la calidad del suelo en las cuatro estaciones del año en Tlapacoyan, Veracruz

Impact of coffee agroecosystem management on soil quality in the four seasons of the year in Tlapacoyan, Veracruz

Jonathan Edilberto Márquez de la Cruz

Colegio de Postgraduados, México

jonathan280193@gmail.com

 <http://orcid.org/0000-0001-7052-7316>

Recepción: 14 de septiembre de 2020

Aprobación: 20 de abril de 2021

María de las Nieves Rodríguez Mendoza

Colegio de Postgraduados, México

marinie3@gmail.com

 <http://orcid.org/0000-0002-2701-9671>

José Luis García Cué

Colegio de Postgraduados, México

jlgcue@gmail.com

 <http://orcid.org/0000.0001-6367-2339>

Julio Sánchez Escudero

Colegio de Postgraduados, México

clarijul@hotmail.com

 <http://orcid.org/0000-0001-5347-016X>

Juan Ángel Tinoco Rueda

Universidad Autónoma Chapingo, México

tinoco@correo.chapingo.mx

 <http://orcid.org/0000-0001-7052-7316>

RESUMEN

Se comparan suelos de cafetales con diferente pendiente y manejo durante un año. En cuatro cafetales (manejo órgano-mineral, agroecológico con mínimo manejo, manejo convencional y manejo agroecológico) se llevó a cabo el muestreo de suelo por estación del año y se cuantificó materia orgánica, carbono orgánico, N, P, K, CIC, pH, textura y respiración microbiana. Los suelos con manejo agroecológico presentaron valores más altos de materia orgánica (10.09%) y respiración microbiana (621 $\mu\text{g C.CO}_2$). Por estación del año varió carbono orgánico, N, materia orgánica y respiración microbiana. La materia orgánica y respiración microbiana fue similar en cafetales con misma pendiente. No hay una relación directa de calidad del suelo y rendimiento de café. En Tlapacoyan la producción de café disminuye y la sustentabilidad y calidad de los suelos también.

PALABRAS CLAVE: carbono orgánico, materia orgánica, respiración microbiana.

ABSTRACT

Soils of four coffee plantations (organo-mineral, agroecological management with minimal management, conventional management and agroecological management) with different slopes and management were compared for one year. Soil sampling was carried out by season, organic matter, organic carbon, N, P, K, CEC, pH, texture and microbial respiration were measured. Organic carbon, N, organic matter, and microbial respiration varied. Soils with agroecological management presents higher values of organic matter (10.09%) and microbial respiration (621 $\mu\text{g C.CO}_2$). Organic matter and microbial respiration were similar in coffee plantations with the same slope by season. There is a direct relationship between the content of organic matter, nitrogen with microbial respiration and other soil properties, but not with the coffee yield. Tlapacoyan coffee production decreases, at the pair with the sustainability and quality of the soils because of the adoption of technologies with the use of agrochemicals.

KEYWORDS: organic carbon, organic material, microbial respiration.

INTRODUCCIÓN

En México la producción de café es una actividad agrícola con importancia ecológica porque más del 90% de los cafetales son sistemas agroforestales con sombra diversificada. Además, los suelos de estos sistemas presentan alto contenido en materia orgánica, son biológicamente activos, con buena capacidad de reciclaje y retención de nutrientes (Ruelas *et al.*, 2014). Estos cafetales diversificados son catalogados como agroecosistemas sustentables (Altieri y Nicholls, 2002; Gliessman, 1998).

La variabilidad en las propiedades de los suelos en los cafetales se debe sobre todo a los factores edafoclimáticos y a las técnicas utilizadas en la producción del cultivo (López *et al.*, 2016). Al respecto, estas diferencias de manejo modifican el contenido de materia orgánica y afectan los procesos de mineralización, disponibilidad nutrimental y actividad de los microorganismos, responsables en gran parte de la fertilidad y que se convierten en indicadores idóneos de sustentabilidad de las parcelas, como las variables relacionadas con el mantenimiento de la estructura, infiltración, suministro, almacenamiento de agua del suelo (Pardo-Plaza *et al.*, 2019; Vallejo, 2013).

La respiración microbiana es el indicador más usado para conocer la actividad microbiana de un suelo (Navarrete *et al.*, 2011) debido a que son altamente sensibles a manejos antropogénicos respondiendo a escalas de tiempo más cortas que las variables físicas y químicas (Di Ciocco *et al.*, 2014; Ferreras *et al.*, 2009; Paolini, 2017). Esta variable depende de factores como la humedad, temperatura, oxigenación, composición de la flora y etapa de sucesiones, por lo que es crucial estudiar su actividad de manera estacional (Acosta *et al.*, 2006; Alvear *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2009).

Por tradición, los agroecosistemas de las comunidades de Tlapacoyan son dinámicos y complejos, con una alta riqueza sociocultural y resilientes por la diversificación productiva que presentan en la asociación café-plátano-cítrico; sin embargo, para incrementar los rendimientos y por la disminución de mano de obra, están adoptando tecnologías con uso de herbicidas, agroquímicos y fertilizantes minerales que pone en peligro la sustentabilidad al incidir de esa manera sobre los recursos naturales (Cruz *et al.*, 2015; Salgado, 2014). Con base en lo mencionado, el objetivo de la investigación de este artículo es cuantificar el impacto de manejo de cuatro cafetales en las propiedades químicas, físicas y microbiológicas del suelo, así como verificar si hay una correlación entre los valores de estas variables con las estaciones del año y la producción en Pochotitán, municipio de Tlapacoyan, Veracruz.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo entre 2018 y 2019 en la comunidad de Pochotitán, municipio de Tlapacoyan, Veracruz, la cual se encuentra ubicada en las coordenadas 19° 54' 45" Norte y 97° 12' 45" Oeste a una altura de 550 msnm. Su clima es semicálido húmedo con un rango de temperatura media anual de 23°C y una precipitación de 1 900-3 600 mm (INEGI, 2015). Se localizaron cuatro propiedades cafetaleras con sistema tradicional de policultivo (café-cítricos-plátano), así como diferentes manejos agronómicos: *a*) Órgano-mineral (Om), de 9 800 m² y una pendiente de 62°; se caracteriza por tener un sistema de producción de café, cítricos y plátano, aplica una vez al año distribuido en el cafetal 250 kg de NPK (10-4-14) y agrega los residuos de plátano y podas en sus suelos, elaboran bocashi y sulfocálcico que incorpora a los cultivos. Por la pendiente que tiene, como estrategia para no perder suelo, hace terrazas con los troncos del platanar. *b*) Agroecológico con un mínimo manejo (Aec-mm) de 9 800 m² y una pendiente de 60°, que esta continua a la Om, es muy diversificada, tiene plantas de café, plátano, cítricos y árboles maderables. Desafortunadamente, por falta de mano de obra que le ayude no le dan ningún manejo y sólo cosecha lo poco que producen los cultivos. *c*) Convencional (Cvc) de 9 900 m² con manejo de herbicida, plaguicidas y fertilizantes minerales. Esta propiedad hace tres años dejó de ser orgánica porque no le pagaban su producto a mejor precio. *d*) Agroecológico (Aec) con una extensión de 1 000 m² donde usan

abonos orgánicos, manejo de arvenses, control de erosión con incorporación de residuos de cosechas y plagas y enfermedades con formulaciones orgánicas.

Los muestreos de suelo se hicieron en cada estación del año y las condiciones atmosféricas de temperatura y de precipitación por periodo se obtuvieron de la estación climatológica Las Margaritas, Hueytamalco, localizada a 7.1 km de Pochotitán (cuadro 1). Por estrategia, los terrenos de las fincas se dividieron en tres partes iguales y en cada uno de ellos con una barrena tipo espiral utilizando el método de zig-zag y a una profundidad de 25 cm, se obtuvieron diez muestras simples para formar al final y tres muestras compuestas por cada finca.

CUADRO 1
Condiciones atmosféricas, precipitación y temperatura^[1]

Periodo	Precipitación (mm)	Temp. máxima (°C)	Temp. min (°C)	Temp. promedio (°C)
Primavera 2018	536 mm	29 °C	17.1 °C	23.13 °C
Verano 2018	933 mm	30.8 °C	19.6 °C	25.2 °C
Otoño 2018	1 745 mm	27.5 °C	17.3 °C	22.4 °C
Invierno 2019	630 mm	22.13 °C	11.3 °C	17.5 °C

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (2020).

En el laboratorio a las doce muestras de suelo por estación del año se les determinó carbón orgánico (CO), materia orgánica (MO) (Walkey-Black), pH (extracto acuoso relación 1 : 2), nitrógeno total (micro-Kjeldahl), fósforo (Olsen), potasio (extracto de saturación 1 : 2 por espectrofotometría de emisión de flama), capacidad de intercambio catiónico (acetato de amonio), bases intercambiables y textura de suelo (método de la pipeta) mediante los procedimientos establecidos en la NOM-021-SEMARNAT-2000. La respiración microbiana se midió de acuerdo con Anderson (1982), de los doce suelos en cada estación del año, se instalaron cinco repeticiones y tres testigos (63 frascos) en un diseño al azar, las muestras se incubaron a una temperatura de 25 °C y cada tres días hasta llegar a los 21 días (siete lecturas) se hizo la titulación del NaOH que estaba en incubación. La cantidad de CO₂ liberado se calculó mediante la fórmula:

$$mg C - CO_2 = \frac{(VB - VM)(MHCl)(6)}{S}$$

Donde:

VB = volumen de HCl consumidos para titular el blanco

VM = volumen de HCl consumidos para titular la muestra

MHCl = concentración de ácido clorhídrico

6 = Peso equivalente del carbono

S = peso de la muestra en gramos

Los resultados obtenidos de las pruebas fisicoquímicas y la respiración microbiana para cada estación del año y cada finca fueron analizados con el paquete SAS (versión 9.4) y sometidos a pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y homocedasticidad (test de Bartlett). Se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) con $\alpha = 0.05$, y comparación de medias a través de la diferencia mínima significativa honesta de Tukey ($\alpha = 0.05$).

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza de las propiedades químicas del suelo entre los cafetales y periodo de muestreo indicó diferencias altamente significativas para CO, MO, y N por estación del año, por cafetal y su interacción. Las bases intercambiables (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) y el pH no presentaron diferencias significativas en su interacción (cuadro 2).

En el fósforo (P), el potasio soluble (Ks) y el potasio K^+ no se detectaron diferencias significativas. También, los coeficientes de variación en Ca^{2+} y Mg^{2+} indican mayor dispersión en la información obtenida por cafetal, por estación y la interacción cafetal por estación.

CUADRO 2

Análisis de varianza de propiedades químicas del suelo de cuatro cafetales y estaciones del año en Tlapacoyan

FV	CO	MO	N	CIC	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	pH
Cafetal	**	**	**	*	*	**	**	**
Estación	**	**	**	**	**	**	**	**
Cafetal*Est.	**	**	**	ns	ns	**	ns	ns
CV	16.1	16.1	13.3	25.1	27	39	34.1	8.7
R ²	0.84	0.84	0.93	0.68	0.73	0.82	0.71	0.61
F calculada	11.28	11.28	28.76	4.55	5.86	10.30	5.18	3.40
Media	4.03	6.9	3.22	33.3	0.30	3.53	17.9	5.84

Fuente: elaboración propia.

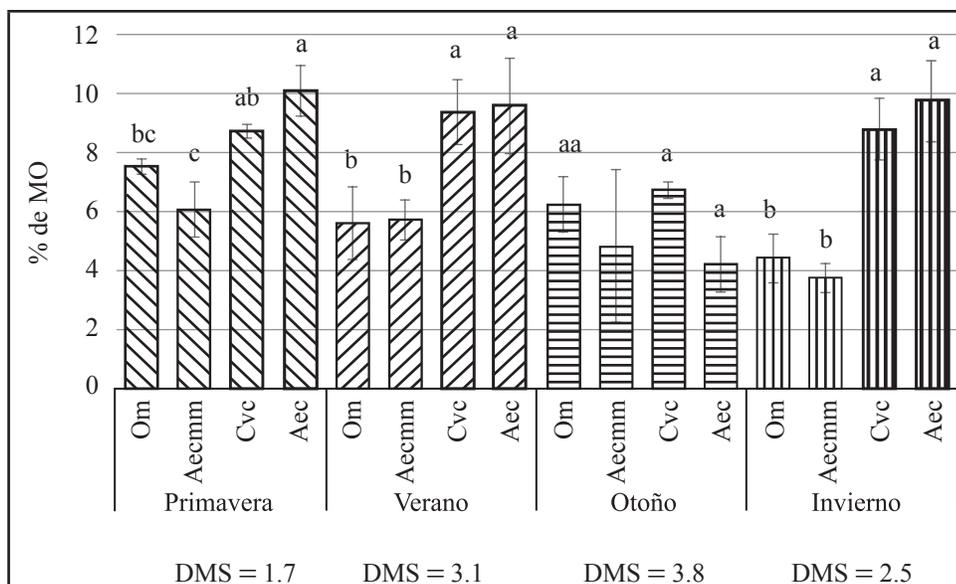
Nota: CO = carbón orgánico, MO = materia orgánica, N = nitrógeno, CIC = capacidad de intercambio catiónico, Na, Ca, Mg = potasio, sodio, calcio, magnesio intercambiable, * = significativo $P \leq 0.05$, ** = altamente significativo $P \leq 0.01$, ns = no significativos.

Los resultados de los cuatro sitios indican que los suelos tienen un alto contenido de materia orgánica que va de 3.74 % en el Aecmm hasta 10.09 % en el cafetal Aec de acuerdo con lo reportado por Castellanos *et al.* (2000). La gráfica 1 muestra como los suelos del cafetal Cvc y el Aec presentan los valores más altos de materia orgánica en primavera, verano e invierno y son estadísticamente iguales. A pesar que el manejo entre el cafetal Cvc y Aec son diferentes en su totalidad, el tener valores similares podría parecer incongruente; sin embargo, tiene mucho que ver con el hecho de que el productor, quien hace el manejo convencional, tiene apenas tres años que dejó la producción orgánica porque no le pagaban su cosecha como orgánica decidió ir a trabajar algunos meses a Estados Unidos y su esposa, que se quedó a cargo del cafetal, se encargó de llevar el manejo y aplicar herbicidas y fertilizantes minerales en bajas concentraciones (comunicación personal). Por eso el suelo aún tiene propiedades de un manejo agroecológico. La gráfica 1 muestra cómo esta variable se modifica por estación y disminuye en otoño. En esta época se presentaron las lluvias con mayor intensidad (cuadro 1), por lo que se cree que influyó en la pérdida de minerales y materia orgánica (Fernández-Raga *et al.*, 2017). Al respecto, en esa estación el contenido de materia orgánica fue estadísticamente igual en los cuatro cafetales.

En el suelo de cafetal Aec la materia orgánica en primavera, verano e invierno fue de 10.09%, 9.59% y 9.75%; sin embargo, en otoño el valor se reduce hasta 41.92% su valor respecto a primavera (gráfica 1). Esta disminución de materia orgánica se adjudica más que nada a la intensa época de lluvia que hubo en ese periodo (1 745 mm).

La materia orgánica de los suelos de las fincas proviene principalmente de la hojarasca producida por los cafetales y los árboles de sombra, participa en el suministro de nutrientes y ejerce un control sobre la economía del agua, aumenta la porosidad y favorece la infiltración minimizando las pérdidas del suelo (López *et al.*, 2016; Farfán, 2010). En los cuatro cafetales de estudio había algunos árboles maderables y en todos de plátano y cítricos. Esta materia orgánica es utilizada por los microorganismos; sin embargo, no basta con tener materia orgánica, nutrientes, factores como pH, humedad y CIC que influyen en la actividad microbiana encargada de los procesos.

En el cuadro 3 se muestran los resultados de CO, N, CIC y pH. El contenido de carbono orgánico varió desde 2.1% hasta 5.9% y los valores más bajos se presentaron en suelos de Aecmm, un cafetal que podría decirse está abandonado, pues sólo cortan en la época de cosecha. El N tuvo la misma tendencia que la materia orgánica: en primavera e invierno se presentan los valores más altos (6.8, 8 y 5.7 y 6.5%) que corresponde a los cafetales Cvc y Aec. Los valores presentados se deben en especial al manejo orgánico que hasta hace poco tenía la finca convencional y por el manejo agroecológico que siempre se ha hecho en el cafetal.



GRÁFICA 1

Materia orgánica en suelos de cafetales de Tlapacoyan en las cuatro estaciones del año

Fuente: elaboración propia.

Nota: Om (órgano-mineral), Aecmm (agroecológico mínimo manejo), Cvc (convencional), Aec (agroecológico). Valores con la misma letra en el mismo periodo son estadísticamente similares con base en la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

El valor promedio de pH más alto por finca lo mostró la finca Aec con 6.1, mientras que el pH más bajo lo mostró la finca Aecmm con 5.4 (cuadro 3). El valor óptimo de pH del suelo para el café es de 5 y 5.5 (Sadeghian, 2016); estos valores se relacionan de forma directa con la cantidad de materia orgánica que se incorpora al suelo y que incrementó el CIC y las bases intercambiables. Los suelos de cafetal Aec con alto contenido de materia orgánica, carbono orgánico y CIC indican que hay un reciclaje de nutrientes y la posibilidad de retener o intercambiar más cationes, así una como reserva del suelo (Farfán, 2010). El pH disminuye en la medida en que hay menor incorporación de la materia orgánica al suelo y conforme se incrementa va subiendo el pH y las propiedades *buffer* del suelo (Contreras *et al.*, 2019 y Silva-Sánchez *et al.*, 2019). Las fincas Aec y Om son las que durante el año incorporan constantemente residuos de cosecha y de podas con la finalidad de mejorar las propiedades de fertilidad, humedad y la porosidad del suelo.

La cantidad de nitrógeno total en el suelo varió entre las diferentes fincas, el valor promedio de las cuatro estaciones más alto (5.1 g kg^{-1}) se presentó en la finca Aec, seguido del suelo de la finca Cvc con 4.85 g kg^{-1} , después la finca Om con 3.22 g kg^{-1} y por último el de la finca Aecmm con 2.80 g kg^{-1} (cuadro 3). Estos valores tienen mucho que ver con el manejo de las fincas, por ejemplo en la de mínimo manejo, donde no se aplica materia orgánica, el valor es muy bajo en comparación con lo encontrado en suelos cafetaleros de Colombia (4.7 g kg^{-1} de N en producción de café es a pleno sol con manejo convencional) y 5.1 g kg^{-1} para café con semisombra (Sadeghian, 2016). En Veracruz se reportaron valores de nitrógeno en fincas orgánicas de 4 g kg^{-1} (Rosas *et al.*, 2008).

El fósforo en los suelos de todas las fincas estuvo alto y en un intervalo de 15.91 ppm a 33.8 ppm, muy por encima de lo reportado en otras zonas cafetaleras que es de 9.75 ppm en cafetales bajo sombra a 21.43 ppm a libre exposición solar (Cardona y Sadeghian, 2005). Estos incrementos tienen que ver con la aplicación de fertilizantes minerales. El potasio soluble presentó rangos de 11.70 a 41.3 ppm.

Los valores de CIC fueron de 20.1 a $59.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (cuadro 3) con un valor medio de $33.50 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, valores muy similares a los encontrados en suelos de cafetales en el estado de Chiapas ($4.48 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ - $46.96 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) (López *et al.*, 2016). Aunque la estrategia de manejo agroecológico es incrementar MO y CIC, no siempre se obtienen resultados favorables y esto tiene mucho que ver con la búsqueda de incrementar el rendimiento. En

el mismo estado de Veracruz en cafetales de Ocotac Chico el CIC es mucho más baja (5.2 a 11.4 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) a pesar de ser suelos de origen de bosque caducifolio (Ávila y Zamora, 2010).

CUADRO 3
Propiedades químicas del suelo por estación del año en cuatro cafetales de Tlapacoyan

Estación del año	Cafetal	Carbón orgánico (%)	Nitrógeno (g kg^{-1})	CIC $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$	pH
Primavera	Om	4.4 bc	4.9 b	34.2 ab	6.0 ab
	Aecmm	3.5 c	4.2 b	25.6 b	5.5 b
	Cvc	5.1 ab	6.8 a	26.0 ab	5.9 ab
	Aec	5.9 a	8.0 a	44.5 a	6.8 a
Verano	Om	3.2 b	2.5 b	30.2 a	6.2 ab
	Aecmm	3.4 b	2.2 b	20.1 a	6.0 ab
	Cvc	5.5 a	3.8 a	23.3 a	6.2 ab
	Aec	5.6 a	3.7 a	35.3 a	6.7 a
Otoño	Om	3.7 a	2.8 b	29.6 b	5.9 a
	Aecmm	2.9 a	2.0 c	25.3 b	5.8 a
	Cvc	3.9 a	3.1 a	34.8 b	5.9 a
	Aec	2.5 a	2.3 bc	59.2 a	5.0 b
Invierno	Om	2.6 b	2.7 b	34.8 a	5.0 ab
	Aecmm	2.1 b	2.8 b	33.6 a	4.5 b
	Cvc	5.1 a	5.7 a	30.3 a	5.6 a
	Aec	5.7 a	6.5 a	48.9 a	6.0 a

Fuente: elaboración propia.

Nota: cafetales Om = órgano-mineral, Aecmm = agroecológico mínimo manejo, Cvc = convencional, Aec = agroecológico.

La textura de los suelos fue franco arcillo limoso y franco arcillosos (cuadro 4), que coincide con otras fincas que tienen asociación de café, plátano y cítrico (Durango *et al.*, 2015; Martínez *et al.*, 2010). El alto contenido de limo y arcilla con los valores de CIC comprueba que son suelos con capacidad de almacenamiento de nutrientes, ideal para los cultivos.

La respiración microbiana es un indicador de la actividad microbiana y de las raíces, así como de la sustentabilidad de los suelos y varía tanto espacial como estacionalmente; los principales factores que influyen en la actividad de los microorganismos son la materia orgánica, la humedad y la temperatura (Hinostruzal *et al.*, 2016; Alvear *et al.*, 2007).

La gráfica 2 muestra la producción acumulada del CO_2 (respiración) o mineralización por estación del año en los cuatro cafetales.

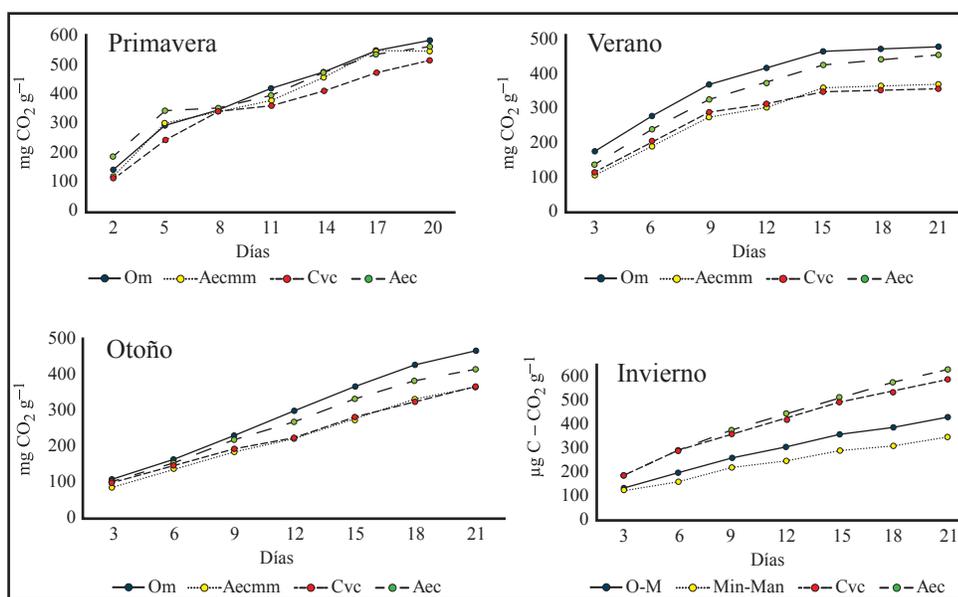
CUADRO 4
Textura del suelo en fincas cafetaleras de Tlapacoyan

Finca	Arena %	Limos %	Arcillas %	Clase textural
Órgano-mineral	10.1	51.4	38.6	Franco arcillo limoso
Agroecológica (mín. manejo)	21.3	43.3	35.4	Franco arcilloso
Convencional	13.2	50.4	36.4	Franco arcillo limoso
Agroecológica	15.2	55.5	29.3	Franco arcillo limoso

Fuente: elaboración propia.

Primavera e invierno fueron las estaciones donde los suelos presentaron mayor actividad microbiana con producción promedio a los 21 días de 547 y 495 $\mu\text{g CO}_2 \text{ g}^{-1}$ respectivamente. Estos resultados se relacionan con el porcentaje de materia orgánica que se encontró en primavera (gráfica 1). En verano y otoño se produjo 415 y 401 $\mu\text{g CO}_2 \text{ g}^{-1}$, lo que equivale a una disminución de 26% de respiración en los suelos de otoño respecto a primavera; este detrimento de actividad microbiana coincide con la disminución de la materia orgánica (gráfica 1), carbono y nitrógeno (cuadro 3)

En primavera, los suelos del cafetal Aec las dos primeras lecturas de incubación incrementaron de manera notable la respiración (192 y 344 $\mu\text{g CO}_2 \text{ g}^{-1}$), lo que equivale al 65 y al 40% más sobre el cafetal Cvc que en los mismos días dio lecturas de 116 y 245 $\mu\text{g CO}_2 \text{ g}^{-1}$. Estas diferencias de respiración entre los suelos, se deben principalmente a la riqueza en MO de los suelos Aec las moléculas de fácil mineralización se consumen a corto plazo debido a los requerimientos de los microorganismos en lo individual y la producción de CO_2 a largo plazo se debe a la participación de especies microbianas especializadas en la mineralización en productos orgánicos más específicos (Ward *et al.*, 2017). Después de los nueve días de incubación, la mineralización es lineal. En los suelos del cafetal Cvc la respiración fue menor que en los otros suelos (gráfica 2).



GRÁFICA 2

Producción de C- CO_2 durante la incubación *in vitro* de suelos provenientes de cuatro cafetales con diferentes manejos^[2]

Fuente: elaboración propia.

En verano se incrementó la temperatura en la región e iniciaron las lluvias, aunque aún no se había establecido el temporal (información dada por los productores); en esta época hubo una diferenciación marcada en la respiración. Los suelos de Om y Aec incrementaron 33% y 21% de CO_2 sobre los de Cv y Aecmm, un agroecosistema cafetalero con manejo agroecológico, diversificado y con alta sombra presenta una condición similar a la de un ecosistema natural y crea condiciones ideales, por ejemplo que las poblaciones microbianas del suelo se incrementen y esto se refleja en la respiración (Chavarría *et al.*, 2012; Velmourougane, 2017). A pesar de estar bien documentado que el cambio en la cobertura del suelo y las prácticas de manejo influyen en la respiración microbiana (Thomazini *et al.*, 2015), tener valores similares de respiración en los suelos donde no se hace ningún manejo (Aecmm) y en donde como estrategia utilizan fertilizantes y herbicidas es desconcertante, porque las condiciones son opuestas y se esperaría diferencias notables en la cuantificación. Bajo estas circunstancias el contenido de materia orgánica fácilmente mineralizable estuvo disponible hasta 15 días de incubación como se puede observar en las líneas de la gráfica 2 en verano. Posterior a esa fecha, la curva

tiende a formar una meseta. En los primeros días esta mineralización rápida se da por la descomposición de compuestos disponibles (azúcares, lípidos, etc.) y conforme pasan los días esta se tornará más lento indicando la disminución de nutrientes para los microorganismos hasta la estabilización (Acosta *et al.*, 2006; Guerrero *et al.*, 2012). El productor de Om por estrategia colocó sobre el suelo residuos de las podas para mantener la humedad, lo que hizo que la actividad microbiana y de las raíces optimizara así la disponibilidad nutrimental. La actividad microbiana en verano fue menor que la de primavera, como lo indica la escala de la gráfica.

En otoño, los suelos de los cuatro cafetales presentaron valores más bajos de respiración; esta tendencia es la misma que se presentó con las variables químicas de estudio en el suelo. Los residuos orgánicos que ingresan al agroecosistema modifican las poblaciones microbianas y la respiración (Mora, 2006; Pajares *et al.*, 2010; Pastor *et al.*, 2010). La misma tendencia de verano se presentó en otoño, aunque hubo lluvias torrenciales en la comunidad de estudio. Los cafetales Aecmm y Cvc presentaron menor actividad microbiana que aquellos donde se practican estrategias agroecológicas y de conservación del suelo y humedad. Paolini (2017) encontró diferencias similares al comparar la producción de CO₂ en suelos de fincas cafetaleras con diferente manejo (convencional, orgánico y tradicional). Al inicio de la incubación y en la primera lectura (gráfica 2, otoño) los cuatro suelos tenían casi la misma velocidad de mineralización de la materia orgánica y es a partir del sexto día que se observa la tendencia entre los suelos. Las respuestas también tienen que ver con las condiciones de manejo de los cafetales (Paz-Ferreiro y Fu, 2013).

En invierno la respiración fue muy similar a la de los suelos muestreados en primavera; sin embargo, los suelos de cafetal Om, que se habían destacado por el incremento en la respiración en primavera, verano y otoño, en esta época quedan por debajo de los suelos Aec y del Cvc que produjeron a los 21 días 621 y 585 µg CO₂ g⁻¹. Los suelos de los cafetales que están en pendientes pronunciadas presentaron menor cantidad de CO₂ (427 y 347 µg CO₂ g⁻¹ Om y Aecmm respectivamente) (gráfica 2, invierno). Resultados similares reporta Chavarría *et al.* (2012) en suelos de café de sombra (640 µg C-CO₂ g⁻¹) comparados con suelos de cafetales a pleno sol con (440 µg C-CO₂ g⁻¹). La teoría indica que en cafetales de sombra con manejo agroecológico hay mayor actividad microbiana, aunque hay estudios que reportan un incremento en la respiración microbiana en suelos cafetaleros bajo exposición a sol (manejo convencional). El argumento es que puede deberse a la temperatura, manejo de podas, arvenses y nutrimentos generado por la fertilización mineral aplicada (Alvear *et al.*, 2007; Cardona y Sadeghian, 2005; Guerrero *et al.*, 2012).

Los cafetales producidos como monocultivo y a pleno sol pueden incrementar sus rendimientos por la incorporación de los fertilizantes, pero a costa de la sustentabilidad del suelo que poco a poco se merma y la actividad de la biota también (Guerrero *et al.*, 2012). Las modificaciones edafológicas son un factor que puede aumentar o disminuir la actividad microbiana y la respiración (Reyes *et al.*, 2011). Debido a que la calidad del suelo ya no puede estudiarse con un componente aislado, es necesario entender el recurso suelo como un sistema vivo dinámico que tiende a estar en equilibrio bajo la interacción de factores físicos, químicos y biológicos (Paz-Ferreiro y Fu, 2013).

La información del cuadro 5 muestra el rendimiento de cosecha que se obtuvo por cafetal. En los cuatro sitios, la producción de café va de baja (0.8 t ha⁻¹) a muy baja (0.2 t ha⁻¹). En comparación con la producción nacional, que es de 1.4 t ha⁻¹ (CEDRSSA, 2018), es gracias a los cítricos y el plátano que los productores pueden incrementar sus ingresos con la venta de sus productos. Esta asociación de vegetación primaria y árboles introducidos como cítricos y plátano es común en el estado de Veracruz (López *et al.*, 2016).

El cafetal Aecmm tiene rendimientos muy bajos, pero como dice la dueña: “De no hacerle nada, algo saco pa comer”. En el cafetal Om se obtuvo el mayor rendimiento de café y de plátano, ya que la ventaja de una fertilización combinada (orgánica y mineral) favorece la disponibilidad de nutrimentos en forma inmediata y a mediano y largo plazo con la mineralización del orgánico (Sancho *et al.*, 2019). El cafetal Aec incrementó notablemente los rendimientos de cítricos y plátano, el manejo de la plantación con estrategias agroecológicas lleva más de 30 años y, a pesar de que el rendimiento del café es 42.8% menor que la media nacional, los otros

dos frutales le permitieron al pequeño productor garantizar de alguna forma un ingreso alimentario y económico que va a permitir a la familia dueña del cafetal no depender sólo del café, sobre todo cuando los precios bajan (Moreno B., 2013). Por su parte, el cafetal Cvc, a pesar de que a tuvo uno de los mejores rendimientos de café, su producción de cítricos y plátano fue baja.

CUADRO 5
Rendimiento por hectárea de café, cítricos y plátano de los cuatro cafetales de estudio en 2018

Cafetal	Rendimiento t ha ⁻¹		
	Café cereza	Cítricos	Plátano
Órgano-mineral	0.8	2	15
Agroecológico mínimo manejo	0.2	0.2	1.5
Convencional	0.8	2	8
Agroecológico	0.6	15	13

Fuente: elaboración propia con base en información proporcionada por los productores de cafetales.

ANÁLISIS PROSPECTIVO

Con pruebas sencillas y no caras es posible identificar las propiedades químicas y biológicas que indican la sustentabilidad del suelo. Tener una herramienta útil para los productores de café que permita en forma simple identificar la calidad del suelo y buscar alternativas de manejo de la finca lo más cercano a la sustentabilidad. Esto da la oportunidad de analizar con cada uno de los productores qué estrategias debían seguir y cuáles serían convenientes modificarse para tratar de recuperar las propiedades químicas y biológicas del suelo. Los cuatro productores coinciden en que viven de sus fincas y, por lo tanto, deben de hacer el máximo esfuerzo para mantenerlas con mayor biodiversidad y lo más productivo posible. En la búsqueda del manejo sustentable es necesario rescatar el manejo tradicional de los cafetales con la finalidad de obtener frutos sanos y poder comercializarlos a mejor precio.

CONCLUSIONES

La materia orgánica, carbono orgánico y respiración microbiana varió de acuerdo con la estación del año, tipo de sistema de producción y localización de los cafetales en la zona de estudio. El manejo que el productor le da al cafetal agroecológico incrementó los valores en la mayoría de las variables químicas y la respiración microbiana, por lo que se considera el mejor sistema de producción para mantener la calidad del suelo.

La incorporación de fertilizante mineral y herbicidas favorece las propiedades químicas del suelo y el rendimiento del café más no la respiración microbiana, que es importante en la sustentabilidad de un suelo. En este sentido, en los cuatro cafetales seleccionados el manejo de los sistemas de producción impacta en la calidad del suelo, y no siempre en el rendimiento del café.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los productores de Pochotitán, Tlapacoyan, Veracruz su participación. Asimismo, se extiende el agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento otorgado para la investigación y también al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo por brindar todos los apoyos requeridos y poder hacer posible el trabajo.

Los autores agradecen las aportaciones hechas por los evaluadores que permitieron hacer ajustes técnicos necesarios para la publicación.

REFERENCIAS

- Acosta, Y., Cayama, J., Gómez, E., Reyes, N., Rojas, D. y García, H. (2006). Respiración microbiana y prueba de fitotoxicidad en el proceso de compostaje de una mezcla de residuos orgánicos. *Multi-ciencias*, 6(3), 220-227.
- Altieri, M. A. y Nicholls, C. I. (2002). Un método agroecológico rápido para la evaluación de sostenibilidad en cafetales. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*, 64, 19-24.
- Alvear, M., Huaiquilao, R., Astorga, M. y Reyes, F. (2007). Actividades biológicas y estabilidad de agregados en un suelo del bosque templado chileno bajo dos etapas sucesionales y cambios estacionales. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 7(3), 38-50.
- Anderson, J. P. (1982). Soil respiration. In D. R. Keeney, R. H. Miller, A. L. Page, (eds.), *Methods of soil analysis, Part 2: Chemical and Microbiological properties* (2nd ed.). American Society of Agronomy Inc (pp. 831-871). Wisconsin.
- Ávila, C. y Zamora, P. (2010). Producción de hojarasca y materia orgánica en agroecosistemas cafetaleros marginales de Ocotlán, Chico, Veracruz, México. *Polibotánica*, 30, 69-87. <http://doi.org/10.18387/polibotanica.39.5>
- Cardona, D. y Sadeghian, S. (2005). Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Cenicafé*, 56, 348-364.
- Chavarría, N., Tapia, A., Soto, G. y Virginio, E. (2012). Efecto de diferentes sistemas de manejo sobre la calidad del suelo, en fincas cafetaleras de la zona de Turrialba y Orosi. *InterSedes*, 26, 83-105. <https://doi.org/10.15517/isucr.v21i44>
- Castellanos, J. Z., Uvalle-Bueno, J. X. y Aguilar, S. A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelo y agua* (segunda edición). México.
- CEDRSSA. (2018). *El café en México diagnóstico y perspectiva* (Cámara de diputados LXIII Legislatura). Palacio Legislativo San Lázaro.
- Contreras, C. A., Sánchez, M. P., Romero, A. O, Rivera, T. J. A., Ocampo, F. I. y Parraguirre, L. J. F. C. (2019). Prácticas agroecológicas y su influencia en la fertilidad del suelo en la región cafetalera de Xolotla, Puebla. *Acta Universitaria*, 29, 1-16. <https://doi.org/10.15174/au.2019.1864>
- Cruz, R., Uribe, M., Leos, J., Rendón, R., Cruz, A. (2015). Tipología de unidades de producción familiar del sistema agroforestal tradicional café-plátano-cítricos en el municipio de Tlapacoyan, Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 18(3), 323-324.
- Di Ciocco, A., Sandler, V., Falco, L., & Coviella, C. (2014). Actividad microbiana de un suelo sometido a distintos usos y su relación con variables físico-químicas. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 46, 73-85. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382837657006>
- Durango, W., Uribe, L., Henríquez, C., y Mata, R. (2015). Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba. *Agronomía Costarricense*, 39, 37-46.
- Farfán, V. F. (2010). Café orgánico al sol y bajo sombrero. Una doble posibilidad para la zona cafetera de Colombia. *Avances Técnicos Cenicafé*, 399, 2-8.
- Fernández-Raga, M., Palencia, C., Keesstra, S., Jordan, A., Fraile, R., Angulo-Martínez, M. y Cerda, A. (2017). Splash erosion: A review with unanswered questions. *Earth-Science Reviews*, 171, 463-477. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.009>

- Ferreras, L., Toresani, S., Bonel, B., Fernández, E., Bacigalupo, S., Faggioli, V. y Beltán, R., (2009). Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del Suelo*, 27, 103-114. <https://doi.org/10.36331/revista.v2i1.8>
- Gliessman, S. (1998). *Agroecology: ecology processes in sustainable agriculture*. Michigan: ANNN Arbor Press.
- Guerrero, P., Quintero, R., Espinoza, V., Benedicto, A., y Sánchez, R. (2012). Respiración de CO₂ como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de Lupinos. *TERRA Latinoamericana*, 30(4), 355-362.
- Hinostrozal, A., Malca, J. y Suarez, L. (2016). Dinámica de la biomasa microbiana y su relación con la respiración y el nitrógeno del suelo en tierras agrícolas en el valle del Mantaro. *Ciencia y Desarrollo*, 16(1), 17. <https://doi.org/10.21503/cyd.v16i1.1116>
- INEGI (2015). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30183.pdf
- López, B. W., Castro, M. I., Salinas, C. E., Reynoso, S. R., y López, M. J. (2016). Propiedades de los suelos cafetaleros en la Reserva de la Biósfera El Triunfo, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 607-618.
- Martínez, N., Núñez, P., Céspedes, C., Almonte, I. y Pimentel, A. (2010). Diagnóstico de la fertilidad de los suelos cafetaleros de la provincia Barahona, República Dominicana. *Proceedings of the Caribbean Food Crops Society*, 46, 234-243.
- Mora, D. J. (2006). La actividad microbiana: un indicador integral de la calidad de suelo. *Luna Azul*. http://lunazul.ucaldas.edu.co/downloads/Lunazul5_6_9.pdf Jun/2019.
- Moreno B., M. A. (2013). Sistemas de producción de café en arreglos interespecíficos, en F. Gast, P. Benavides, J. R. Sanz, J. C. Herrera, V. H. Ramírez y M. A. Cristan-Cho, S. M. Marín (eds.), *Manual del cafetero colombiano. Investigación y tecnología para la sostenibilidad en la caficultura. Tomo II*. Bogotá: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.
- Navarrete, A. S., Vela, C. G., Lopez B. J. y Rodriguez, C. M. L., (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *Contactos*, 80, 29-37.
- NOM-021-SEMARNAT-2000. NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. *Diario Oficial de la Federación*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Pajares, S., Gallardo, J. y Etchevers, J. D. (2010). Indicadores bioquímicos en suelos de un transecto altitudinal en el eje neovolcánico mexicano. *Agrociencia*, 44, 261-274.
- Paolini, G. J. E. (2017). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *TERRA Latinomerica*, 36, 13-22.
- Pardo-Plaza, Y. J., Paolini G. J. E. y Cantero-Guevara M. E. (2019). Biomasa microbiana y respiración basal del suelo bajo sistemas agroforestales con cultivos de café. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación*, 22(1), 1-8. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1144>
- Pastor, J., Torres, T. y Martínez, A., (2010). Cambios en algunas propiedades biológicas del suelo según el uso de la tierra en el sector el Cebollal, Estado Falcón, Venezuela. *Bioagro*, 22, 217-222.
- Paz-Ferreiro, J., & Fu, S. (2013). Biological indices for soil quality evaluation: Perspectives and limitations. *Land Degradation & Development. Wiley Online library*, 27, 14-25 <https://doi.org/10.1002/ldr.2262>
- Reyes, F., Lillo, A., Ojeda, N., Reyes, R. y Alvear, M. (2011). Efecto de la exposición y la toposecuencia sobre actividades biológicas del suelo en bosque relicto del centro-sur de Chile. *Bosque*, 32, 255-265. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002011000300007>.

- Rosas, J., Escamilla, E. y Ruiz, O. (2008). Relación de los nutrientes del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico. *TERRA Latinoamericana*, 26, 375-384.
- Ruelas, L., Nava, M., Cervantes, J. y Barradas, V. (2014). Importancia ambiental de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 20(3), 27-40.
- Sadeghian, S., (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. *Avances técnicos Cenicafe*, 466,1-12
- Sancho, B. E., Ballesteros, E. D. y Rosal A. D. (2019). El efecto de la fertilización mineral, orgánica y mineral-orgánica sobre las características agroproductivas en plantas de café y de la calidad de taza. *Revista Universidad en Diálogo*, 9(2), 175-185.
- Salgado, R. (2014). Agricultura sustentable y sus posibilidades en relación con consumidores urbanos. *Estudios Sociales*, 23, 114-140.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2020). Disponible en <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologia/informacion-estadistica-climatologica>.
- Silva-Sánchez, A., Soares, M., & Rousk, J. (2019). Testing the dependence of microbial growth and carbon use efficiency on nitrogen availability, pH, and organic matter quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 134, 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.008>
- Thomazini, A., Mendonça, E. S., Cardoso, I. M., & Garbin, M. L. (2015). SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. *Geoderma Regional*, 5, 15-24.
- Vallejo, V. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano : experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16, 83-99.
- Velmourougane, K. (2017). Shade trees improve soil biological and microbial diversity in coffee based system in Western Ghats of India. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 87, 489-487.
- Ward, C. P., Nalven, S. G., Crump, B. C., Kling, G. W., & Cory, R. M. (2017). Photochemical alteration of dissolved organic carbon draining permafrost soils shifts microbial metabolic pathways and stimulates respiration. *Nature Communications*, 8, 1-8.
- Zhu, J., Yan, Q., Fan, A., Yang, K., Hu, Z. (2009). The role of environmental, root and microbial biomass characteristics in soil respiration in temperate secondary forests of Northeast China. *Trees*, 23,189-196.

NOTAS

[1] Datos obtenidos durante la investigación.

[2] Muestreados en las cuatro estaciones del año en Tlapacoyan.

CC BY-NC-ND