

Agricultura de conservación: alternativa para la mitigación del cambio climático en el altiplano semiárido de México

Miguel Ángel Martínez-Gamiño¹

Esteban Salvador Osuna-Ceja^{2,§}

José Saúl Padilla Ramírez²

José Pimentel-López³

1 Campo Experimental San Luís-INIFAP. Domicilio conocido, Ejido Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez, San Luís Potosí. CP. 78431. Tel. 800 088 2222.

2 Campo Experimental Pabellón-INIFAP. Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. AP. 20. CP. 20660. Tel. 55 38718700.

3 Campus San Luís Potosí-Colegio de Postgraduados. Iturbide número 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí. CP. 78620. Tel. 496 9630448.

Autor para correspondencia: osuna.salvador@inifap.gob.mx.

Resumen

Las modificaciones producidas por la agricultura de conservación sobre la dinámica del carbono en el suelo resultan en un aumento del carbono en la fracción del suelo y reduce en gran medida los procesos de oxidación del carbono al disminuir la manipulación mecánica del suelo. El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos acumulativos de 25 años de agricultura de conservación como medio para mejorar la capacidad de resiliencia de los suelos agrícolas ante fluctuaciones climáticas y promover el incremento de los rendimientos, la disminución de la erosión y la emisión de gases de efecto invernadero. En un experimento de largo plazo (1995-2020), bajo una rotación maíz-triticale en riego, se evaluaron dos sistemas de manejo de suelo: 1) labranza convencional (Br +Ra); y 2) labranza cero más 33% de cobertura del suelo con residuos de cosecha (LC+33% C). Las variables evaluadas fueron: carbono orgánico del suelo, estabilidad de los agregados en agua mediante el diámetro peso medio (DPMa), conductividad hidráulica saturada (Ks), densidad aparente (ρ_b) y rendimiento de grano y forraje. Los resultados mostraron que LC+33% el carbono presentó valores significativamente mayores de COS (23.8 Mg ha⁻¹), DPMa (1.2 mm), Ks (8.5 cm h⁻¹) y menor ρ_b (1.19 Mg m⁻³) vs Br + Ra, lo cual es favorable para la sostenibilidad y resiliencia del sistema estructural del suelo. La AC mejora las variables de suelo evaluadas y mejora la calidad del suelo al incrementar el carbono orgánico del suelo.

Palabras clave:

agricultura de conservación, cambio climático, carbono, labranza, materia orgánica.

Introducción

La agricultura convencional que practica el agricultor del Altiplano semiárido del Centro-Norte de México, basada en las labores de barbecho y rastreo de la tierra para voltear la capa arable, es la principal responsable de la degradación del suelo. Este sistema iniciado hace más de medio siglo, hoy en día se demuestra como insostenible, al constituir un modelo emisor de gases de efecto invernadero (GEI) y no contribuir a la conservación y mejora de los recursos naturales (aire, suelo y agua) (Cotler *et al.*, 2016).

Una de las consecuencias del sistema de laboreo intensivo en relación al cambio climático, es la reducción del secuestro de carbono (efecto sumidero) del suelo, cuyo resultado directo es la disminución del contenido de carbono orgánico del suelo (COS), principal componente de la materia orgánica del suelo (MOS), por ello el COS es un indicador de calidad del suelo, sostenibilidad agronómica y de resiliencia ambiental (Lal, 2003; Osuna-Ceja *et al.*, 2006; Carvalho-dos Santos *et al.*, 2012; Van der Wal y de Boer, 2017).

Por su parte, Reicosky (2011) sustenta que la agricultura intensiva ha ayudado a la pérdida entre 30% y 50% de COS en las últimas dos décadas del siglo pasado y continúa hasta estos días. Además, menciona que, las labores de labranza de los sistemas convencionales tienen un efecto negativo sobre el suelo en varios aspectos: principalmente promueve la pérdida de MOS la cual, se pierde entre 20 y 30% en solo dos años de cultivo intensivo.

La calidad de los suelos puede ser comprendida como 'el atributo del suelo para sostener el desarrollo de un cultivo sin causar degradación de tierras o deterioro ambiental' (Bone *et al.*, 2010; Cotler *et al.*, 2016) o bien interpretarse como un vínculo entre la estrategia de conservación, las prácticas de manejo y el alcance de los principales objetivos de la agricultura sostenible (Udawatta *et al.*, 2009; FAO, 2017). La calidad edáfica la compone el estado de sus propiedades inherentes y dinámicas como el contenido de MOS, que está relacionada con funciones sobre el comportamiento físico, químico y biológico del suelo, repercutiendo en su fertilidad y productividad, diversidad de organismos o productos microbianos en un tiempo determinado (Bautista *et al.*, 2004).

La eficacia y calidad de la MOS que se incorpore al suelo afecta, en consecuencia, la calidad edáfica, misma que será función de la tasa con que ésta pasa a formar parte del COS (Cloter *et al.*, 2016). El COS es el componente principal de la MOS. Como indicador de la salud del suelo, el COS es importante por sus contribuciones a la producción de alimentos, la mitigación y adaptación al cambio climático y el logro de los objetivos de desarrollo sostenible y resiliente (FAO, 2017). También, el COS mejora la estabilidad estructural del suelo al promover la formación y estabilización de agregados que, junto con la porosidad, aseguran suficiente aireación e infiltración del agua para un mejor crecimiento de la planta (De León-González *et al.*, 2000).

Asimismo, la presencia del carbono en el suelo conlleva a una mayor resistencia de agregados ante el impacto de fuerzas externas (lluvia o riego, labranza, etc.), al mejorar la capacidad de retención del agua en el suelo, incrementar el contenido de la biomasa microbiana y el reciclaje de nutrientes (Osuna-Ceja *et al.*, 2006; Sandoval-Estrada *et al.*, 2008). Sin embargo, la dinámica de los depósitos de carbono y su calidad es altamente influenciada ante cualquier cambio en las prácticas de manejo agronómico (Bernoux *et al.*, 2006; Docampo, 2010), sobre todo aquellas que involucran la exposición y destrucción de los agregados del suelo.

En ese contexto, a lo largo de los últimos cincuenta años, existe una gran discusión sobre los impactos que el uso del arado y la rastra tienen sobre la calidad de los suelos (Lal, 2007). La inversión del suelo, la destrucción de los agregados por los implementos agrícolas, desprotege y expone a la intemperie a la MOS que está ocluida en pequeños agregados (Alonso y Aguirre, 2011), la cual puede oxidarse como dióxido de carbono (CO₂) (Bedard-Haughn *et al.*, 2006); mientras que cuando los residuos de cosecha se dejan en la superficie del suelo, su incorporación se realiza mediante la actividad de la fauna del suelo (lombrices de tierra y otros

organismos), sin destrucción de los agregados, donde la MOS puede permanecer inmovilizada (Dendooven *et al.*, 2012; Cloter *et al.*, 2016).

En México, los cultivos esquilmáticos como el maíz, sorgo, trigo y cebada que cubren más de 55% de las tierras de riego y temporal (SIAP-SADER, 2019) están sujetos, en su mayoría, a una labranza convencional. En este sistema los suelos permanecen descubiertos la mayor parte del año después de la cosecha, ya que los esquilmos (residuos de hojas y tallos que quedan sobre el terreno después de cosechar el grano o semilla) son retirados del terreno para ser utilizados como alimento del ganado (Fuentes *et al.*, 2001; Villegas *et al.*, 2001), como pastoreo directo o bien son quemados (Cotler *et al.*, 2016); sobre todo en la región Centro-Norte del país (Martínez y Osuna, 2017).

La pérdida de la MOS conlleva a una disminución de fertilidad, a la reducción de la capacidad de retención de humedad y a la pérdida de productividad, lo cual repercute en la necesidad de incrementar la aplicación de fertilizantes para sostener los rendimientos (Alonso y Aguirre, 2011). Uno de los mayores problemas que enfrentan los agricultores al labrar el suelo es la progresiva pérdida de MOS (Cotler *et al.*, 2016).

El objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad de AC como medio para recuperar y conservar la calidad de los suelos agrícolas ante el cambio climático y con ello promover el incremento de los rendimientos, la disminución de los procesos de erosión y la mitigación de GEI, después de 25 años de manejo con AC comparado con el sistema de Agricultura convencional.

Materiales y métodos

El ensayo se realizó en el Campo Experimental San Luis, que se ubica en las coordenadas geográficas 22° 13' 45.8" latitud norte y 100° 51' 01.5" longitud oeste a una altitud de 1 838 m. La precipitación y temperatura media anual es de 210 mm y 16.2 °C. El suelo de la unidad experimental es de tipo Pheozems, de textura franco arcillo-arenosa, con pH alcalino de 8.1, con 1.4% MO y CE de 0.81 dS m⁻¹ con fuertes problemas de compactación en todo el perfil. El agua para riego registró una CE de 0.29 dS m⁻¹ y RAS de 1.26, baja en salinidad y sodicidad (Sarabia *et al.*, 2011).

Desde 1995 se conduce un experimento de largo plazo (25 años) bajo condiciones de riego, donde se compararon dos sistemas de manejo de suelo: 1) labranza convencional barbecho más rastra (Br +Ra); y 2) labranza cero más 33% de cobertura del suelo con residuos de cosecha (LC +33% C), donde se realizan prácticas de rotación de cultivos de gramíneas de primavera-verano (PV) y otoño-invierno (OI) para la producción de grano y forraje. Cada unidad experimental tuvo 240 m² y se usaron dos repeticiones (Martínez y Osuna, 2017).

La rotación de cultivos fue maíz (*Zea mays* L.) PV y triticale (*Triticum aestivum* L.) OI. Para maíz la densidad de población establecida fue 70 000 plantas ha⁻¹ y las dosis de fertilización fueron 200 kg ha⁻¹ N, 100 kg ha⁻¹ P₂O₅ y 00 kg ha⁻¹ K₂O. Para triticale se usó 80 kg ha⁻¹ de semilla y la fertilización fue de 90 kg ha⁻¹ N, 40 kg ha⁻¹ P₂O₅ y 00 kg ha⁻¹ K₂O en este caso. En relación con el control de malezas en el caso de maíz con LC + 33% C en todos los ciclos de cultivo, se hizo una aplicación de herbicida pre-emergente atrazina a 0.75 kg ia. ha⁻¹ después de la siembra mientras que en el sistema convencional Br + Ra se realizaron dos escardas mecánicas a los 21 y 35 dds. El control de plagas se realizó mediante una aplicación de insecticida Spinetoram en dosis de 0.75 ml ia. ha⁻¹ para el control del gusano cogollero.

Determinación del rendimiento de maíz y triticale

En el ensayo de 2020 la cosecha de maíz grano se realizó en forma manual, después de que el grano mostró aproximadamente 15% de humedad. Se cosecharon dos muestras al azar de 6 m de longitud por tratamiento en los dos surcos centrales de cada unidad experimental. En el caso

del triticale, éste se cosechó cuando los granos presentaban un estado lechoso-masoso y se tomaron dos muestras de 1 m² por tratamiento y se expresó como rendimiento de materia seca.

Muestreo y determinación de variables de suelo

En la etapa de cosecha del maíz grano primavera-verano (PV)-2020, se recolectaron ocho muestras inalteradas de suelo por tratamiento a 0-10 cm de profundidad. La densidad aparente (ρ_b) se calculó como el cociente entre la masa de suelo seco a 105 °C (M_{ss}) y el volumen total (V_t) que ocupa esta masa de suelo sin alterar, y se determinó en cada punto de muestreo, mediante la barrena de doble cilindro (Jury *et al.*, 1991). Las muestras de suelo se secaron en una estufa de aire forzado (40 °C) por 24 h y se pasaron por un tamiz de 0.5 mm.

El carbón orgánico del suelo (COS) se determinó con muestras de suelo preparadas según el método AS-01 (SEMARNAT, 2000). La determinación de la materia orgánica del suelo (MOS) se realizó a partir del método de Walkley y Black (AS-07), el cual se basa en la oxidación de COS por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado.

La cantidad de carbono almacenado (CA) en el suelo se estimó con la siguiente ecuación: $CA = COS * \rho_b * Pm * 10\ 000$. Donde: CA= carbón almacenado ($Mg\ ha^{-1}$). COS= porcentaje de carbón orgánico en el suelo (% ρ_b = densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$). Pm = profundidad de la capa de suelo (m). La estabilidad de agregados del suelo en agua se estimó mediante el diámetro peso medio (DPM_a) según Franzluebbers *et al.* (2000). La conductividad hidráulica saturada (K_s) se estimó de acuerdo con Reynolds y Elrick (1990).

Análisis estadístico

A todas las variables (del rendimiento de ambos cultivos y del suelo) se les realizó un análisis de varianza bajo un diseño completamente al azar, en donde se consideró a los dos sistemas de manejo de suelo como tratamientos y se usó la prueba de comparación de media Tukey ($\alpha=0.05$) mediante el software Statistical Analysis Systems, versión 9.1 (SAS, 2013).

Resultados y discusión

Se detectó significancia estadística entre los dos sistemas de manejo de suelo ($\alpha=0.05$) en el contenido de COS, ρ_b , DPM_a y K_s (Cuadro 1). Los resultados del análisis estadístico indicaron que, con excepción de la ρ_b , las demás variables presentaron valores significativamente mayores en labranza cero con 33% de cobertura, como consecuencia de una acumulación mayor de materia orgánica en el tratamiento LC + 33% C (MOS= 5.4%) comparado con el tratamiento Br+ Ra (MOS= 1.7%) en los 0-10 cm del suelo. Esto indica que los rastrojos tienden a favorecer la calidad edáfica cuando permanecen sobre el suelo, lo cual se reflejó en un aumento del COS, en dicha profundidad (Cuadro 1).

Cuadro 1. Valores medios de las variables en dos sistemas de manejo de suelo.

Sistemas	COS ($Mg\ ha^{-1}$)	ρ_b ($Mg\ m^{-3}$)	DPM_a (mm)	K_s ($cm\ hr^{-1}$)
Br + Ra	9.2 b	1.37 a	0.14 b	0.154
LC + 33% C	23.8 a	1.19 b	1.2 a	8.5
CV%	24.42	4.94	18.28	32.12

COS= carbón orgánico del suelo; ρ_b = densidad aparente; DPM_a = diámetro peso medio de agregados estables al agua; K_s = conductividad hidráulica; Br + Ra= barbecho más rastra o labranza convencional y LC + 33% C= labranza cero más 33% de cobertura o agricultura de conservación. Promedios con distinta letra en una columna por parámetro son estadísticamente diferentes según Tukey (0.05).

Al contrario, el tratamiento sin residuos (Br +Ra) tuvo un nivel significativamente menor ($p= 0.05$) de COS que el tratamiento con ciclaje de residuos (LC +33% C), lo que sugiere el alto grado de deterioro de este sistema convencional. Este aumento significativo de COS en la capa superficial del suelo deja entrever la importancia del ciclaje de residuos como una práctica sostenible y resiliente en el tiempo, que además reduce las emisiones del CO_2 a la atmósfera y mitiga los procesos de cambio climático, lo cual coincide con algunos autores como Bronick y Lal (2005).

El valor medio de DPM_a en la labranza convencional mostró un valor bajo, lo cual indica una estabilidad estructural débil. No obstante, la labranza cero con residuo presentó un valor medio significativamente ($p= 0.05$) mayor de DPM_a respecto al tratamiento Br + Ra dentro de los primeros 10 cm de profundidad. Esto denota una mayor proporción de macroagregados debido al efecto de la MOS en el incremento de la estabilidad estructural (Sandoval-Estrada *et al.*, 2008). Lo anterior mejoró la infiltración del agua (Sánchez *et al.*, 2008), reduce la erosión del suelo (Cadena *et al.*, 2012) y disminuye la compactación (López *et al.*, 2018).

La comparación de valores de conductividad hidráulica saturada (K_s) entre ambos sistemas de manejo de suelo, muestra que LC +33% C, presentó significativamente mayor ($p\# 0.05$) tasa de infiltración en relación con Br + Ra. Esto se debió en gran parte al aumento de COS en los primeros centímetros del suelo producto del aporte de rastrojos, lo cual corrobora la bondad del sistema LC +33% C en la creación de poros grandes, estables y continuos en el perfil del suelo.

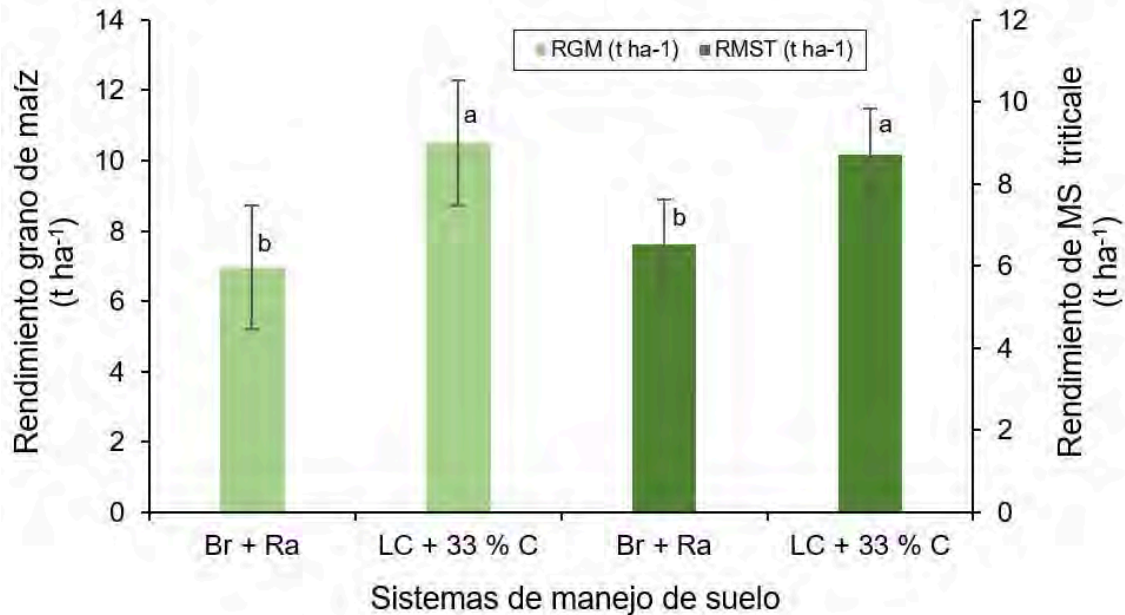
Esta contradicción con el hecho de contarse con tamaños de poros más pequeños dentro de los agregados en los suelos con labranza de conservación refleja la importancia de la descomposición de las raíces y la acción de la fauna del suelo en la producción de poros continuos y estables (Rachman *et al.*, 2003).

Rendimiento de maíz y triticale

Los rendimientos de grano de maíz (RGM) y materia seca de triticale (RMST) en rotación para el ciclo primavera-verano y otoño-invierno 2020, se muestran en la Figura 1. El análisis estadístico para RGM y RMST de ambos cultivos, reportó diferencia entre medias de tratamientos ($p= 0.05$), favorable al tratamiento de labranza cero con residuos. Estas diferencias se atribuyen a la mejora de los indicadores de la calidad del suelo (COS , DPM_a y K_s) así como con el mayor nivel de COS alcanzado y su relación con los cambios de estructura del suelo a largo plazo (Sandoval-Estrada *et al.*, 2008).



Figura 1. Rendimiento medio de grano de maíz (RGM) y materia seca de triticale (RMST) bajo dos sistemas de manejo de suelo. Promedios con letra distinta en la columna son estadísticamente diferentes según Tukey (0.05). Las barras significan error estándar de la media $n = 4$.



Lo anterior es una manera de hacer evidente que la agricultura de conservación (AC) es una alternativa de producción, que incrementa la sostenibilidad, a través de establecer un grado de resiliencia (capacidad de retornar a su condición original al suelo después de un disturbio) y está asociada con el potencial de reducir la emisión de gases de efecto invernadero (Lal, 2003).

Con la AC, el COS se incrementa de manera significativa. En la región del Altiplano semiárido del Centro-Norte de México este incremento puede alcanzar 1.6 veces más COS en los primeros 10 cm, comparado con el sistema convencional después de 25 años o una tasa de incremento de COS de 0.58 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Follett *et al.*, 2005). En esta investigación, el COS en AC fue 2.6 veces más que en el manejo convencional, que representa una tasa promedio de 0.95 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en los 25 años del estudio.

Este aumento está directamente correlacionado con la acumulación en la superficie de los residuos de cosecha que al disminuir su contacto con los microorganismos del suelo provocó una descomposición más lenta de la MOS (Salinas-García *et al.*, 2002), por lo que se aumenta la cantidad de COS secuestrado (Follett *et al.*, 2005). El aumento de COS es evidente en los primeros centímetros de suelo (Fuentes *et al.*, 2010) y logra alcanzar el doble de COS en los primeros diez centímetros, comparado con la labranza convencional, lo cual favorece la formación y estabilización de agregados (Castellanos-Navarrete *et al.*, 2012).

Esta investigación de largo plazo mostró resultados significativos después de 25 años y demuestra como la AC recupera y mantiene la potencialidad del suelo e influye al mismo tiempo en la cantidad de COS que este puede almacenar. En el mismo sentido este sistema propone una condición sostenible de la tierra que establece, la reconstrucción de las reservas de carbono en el suelo en función de las tasas de acumulación de residuos vegetales o biomasa sobre el suelo y la disminución de CO₂ atmosférico y la desaceleración del calentamiento global (Caviglia *et al.*, 2016; Cotler *et al.*, 2016).

La adopción de una AC con una gestión sostenible de la tierra para aumentar el COS y reducir la emisión de CO₂, sería una alternativa resiliente para complementar los esfuerzos de los grandes retos ambientales: cambio climático, degradación de tierras y pérdida de diversidad biológica. Desde otro punto de vista, se señala que la captura de carbono es una responsabilidad para ofrecer alternativas saludables y nuevos beneficios a los agricultores en las zonas áridas y semiáridas de México.

El incremento de la MOS que está enlazada con múltiples funciones básicas del suelo y significa una mitigación de los GEI y del calentamiento global. Todo lo anterior resulta, porque la MOS causa una 'serie de condiciones o funciones' que están relacionadas con las propiedades del suelo, el efecto amortiguador, la capacidad de resiliencia y la sustentabilidad (Burbano-Orjuela, 2018).

Lo anterior implica que el desarrollo de una AC en la que se toma en cuenta el contenido de carbono presente en la MOS (Burbano-Orjuela, 2018). Al retener una mayor cantidad de COS, la AC tiene el potencial de reducir la emisión de CO₂. Bajo este criterio se estima que la conversión de 2.5 millones de hectáreas de cultivos bajo labranza convencional en la región árida y semiárida del Centro-Norte de México hacia AC podría permitir el secuestro neto de 58 g cm⁻² año⁻¹ (Dendooven *et al.*, 2012).

Si bien esta investigación mostró los diversos beneficios ecológicos, económicos y ambientales de la AC, también es importante reconocer ciertas limitaciones que indican que esta tecnología requiere condiciones específicas (manejo de residuos en la superficie) para cada situación a fin de alcanzar un uso del suelo sostenible bajo este sistema. Esta condición puede limitar que el agricultor adopte esta tecnología en algunas regiones, sobre todo en el semiárido del Centro-Norte de México, debido a que usa los residuos del cultivo como forraje para la alimentación del ganado (CENAPROS, 2001). Si esta situación se presenta, el productor puede disponer de la mitad del residuo y dejar la otra mitad sobre el terreno, ya que la adopción de la AC requiere una conversión progresiva de todo el sistema de producción (Beuchelt *et al.*, 2015).

Secuestro de CO₂ en el suelo

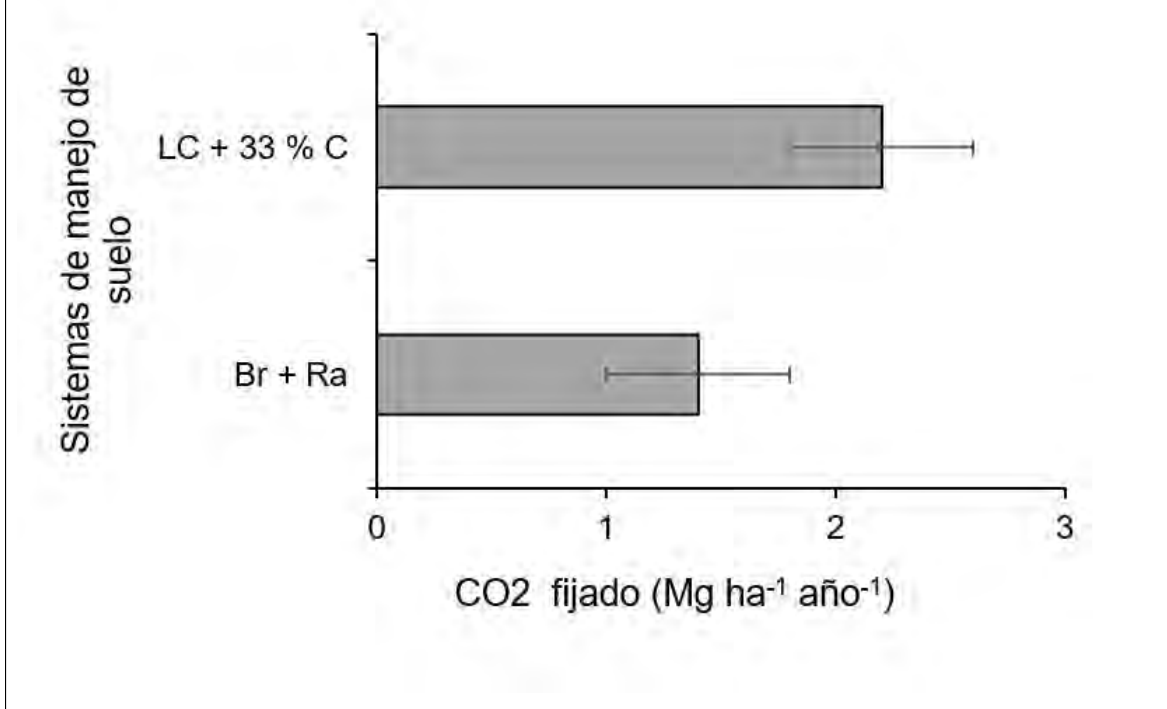
La adopción de la AC supone una reducción drástica de las operaciones de labranza, reducción que, en el caso del método de siembra directa llega a la total eliminación de las labores mecánicas de alteración de la capa arable del suelo. Esta reducción influye sobre el volumen de emisiones de CO₂ que se produce, por un lado, debido a la ruptura de los agregados del suelo y el consiguiente intercambio gaseoso que se ocasiona tras la labranza, y por otro, al consumo de combustible y al consumo energético originado de la realización de las operaciones de laboreo del suelo (González-Sánchez *et al.*, 2012).

Con el cambio de labranza convencional al de AC, el contenido de COS resulta en un aumento de este en la fracción del suelo. Además, la AC reduce en gran medida los procesos de oxidación del carbono al disminuir la manipulación mecánica del suelo. Actualmente existen evidencias en la literatura donde se reporta que a partir de 1 Mg de C se generan 3.7 Mg de CO₂ a través de procesos de oxidación microbiana que tienen lugar en el suelo (González-Sánchez *et al.*, 2012).

Por tanto, los resultados de COS obtenidos adicionan una buena cantidad CO₂, se estima que la AC fijó 2.2 Mg de CO₂ ha⁻¹ año⁻¹, comparado con Br + Ra con solo 1.4 Mg de CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ (Figura 2). En base a estos datos, y sustentados en las cifras reportadas en estudios científicos es posible suponer que, durante los primeros 25 años de AC es probable fijar hasta 57% más CO₂ por hectárea al año respecto al sistema de laboreo convencional basado en la utilización del arado de vertedera y la rastra de discos.



Figura 2. Valores promedio de CO₂ (Mg ha⁻¹ año⁻¹) secuestrado bajo dos sistemas de manejo de suelo.



Así pues, la investigación dio como resultados no solo un mayor control de la erosión del suelo, sino también un descenso de las pérdidas de MOS y de emisiones de CO₂ que se producen como consecuencia del laboreo intensivo del suelo. La no remoción del suelo que considera la AC mejora la estructura de este, aumenta la estabilidad de los agregados frente a los procesos de desagregación, permite una mayor protección de la MOS frente a los ataques de la microfauna edáfica y mantiene 'secuestrado' en el espacio poroso del suelo, el CO₂ resultante de los procesos de mineralización de la MOS (González-Sánchez *et al.*, 2012).

Conclusiones

La actividad agrícola convencional genera gases de efecto invernadero, lo cual favorece el calentamiento global. La agricultura de conservación contribuye al secuestro de carbono en el suelo y a mantiene un balance a favor de una menor liberación de CO₂. La labranza convencional basada en la utilización del arado de vertedera y la rastra de discos, ha llevado a un deterioro de las propiedades edafológicas y a una reducción de su productividad al propiciar cambios en la estructura edáfica que facilitan la oxidación de la MOS y la pérdida de estabilidad de los agregados del suelo.

Después de 25 años de experimentación con AC se mejoró la tasa de infiltración y la cantidad de agua disponible, se disminuyó la erosión, incrementó el rendimiento y mitigó la emisión de GEI. Además, constituye una herramienta heurística útil para el desarrollo de una agricultura sustentable en los territorios productores de cultivos de riego y temporal de las zonas áridas y semiáridas del Centro-Norte de México.

Bibliografía

- 1 Alonso, B. M. y Aguirre, M. J. F. 2011. Efecto de la labranza de conservación sobre las propiedades del suelo. *Terra Latinoam.* 29:113-121.

- 2 Bautista, C. A.; Etchevers, B. J. D.; Del Castillo, R. F. y Gutiérrez, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*. 13:90-97.
- 3 Bedard-Haughn, A.; Jongbloed, F.; Akkerman, A. J.; Uijl, E. J. Y. T. and Pennock, D. 2006. The effects of erosional and management history on soil organic carbon stores in ephemeral wetlands of hummocky agricultural landscapes. *Geoderma*. 135:296-306 pp.
- 4 Bernoux, M.; Feller, C.; Cerri, C. C.; Eschenbrenner, V. and Cerri, P. E. C. 2006. Soil carbon sequestration. *In*: Roose, E. J.; Lal, R.; Feller, C.; Berthès, B. and Stiwart, B. A. Ed. *Soil erosion and carbon dynamics*. Adv. Soil Sci. Taylor & Francis. Boca Ratón, FL. USA. 15-26 pp.
- 5 Beuchelt, T. D.; Camacho, V. C. T.; G#hring, L.; Hernández, R. V. M.; Hellín, J.; Sonder, K. and Erenstein, O. 2015. Social and income trade-offs of conservation agriculture practices on crop residue use in Mexico central highland. *Agric. Syst.* 134:61-75.
- 6 Bone, J.; Head, M.; Barraclough, D.; Archer, M.; Scheib, C.; Flight, D. and Voulvoulis, N. 2010. Soil quality assessment under emerging regulatory requirement. *Environ. Inter.* 36:609-622.
- 7 Bronick, C. J. and Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* . 124:3-22.
- 8 Burbano-Orjuela, H. 2018. El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 35(1):82-96 Doi: <http://dx.doi.org/1022267/rcia.183501.85>.
- 9 Cadena, B. P. D.; Egas, D.; Ruiz, H.; Mosquera, J. y Benavides, O. 2012. Efecto de cinco sistemas de labranza, en la erosión de un suelo Vitric haplustand, bajo cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 29(2):116-128.
- 10 Carvalho-dos Santos, D.; Rodríguez-de Lima, C. L.; Nailto-Pillon, C. y Filippini-Alba, J. M. 2012. Distribución de la materia orgánica en clases de agregados en un Latosol arcilloso rojo bajo forestación y pastizal. *Agrociencia*. 46:231-241.
- 11 Castellanos-Navarrete, A.; Rodríguez, A. C.; Goede, M. R. G.; Kooistra, M. J.; Sayre, K. D.; Brussaard, L. and Pulleman, M. M. 2012. Earthworm activity and soil structural changes under conservation agriculture in Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 123:61-70.
- 12 Caviglia, O. P.; Wingeyer, A. B. y Novelli, L. E. 2016. El rol de los suelos agrícolas frente al cambio climático. *Serie de Extensión INTA Paraná*. 78:27-32.
- 13 CENAPROS. 2001. Centro Nacional de Investigación para Producción Sostenible. Manual de labranza de conservación. Manual núm. 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 85 p.
- 14 Cotler, H.; Martínez, M. y Etchevers, J. D. 2016. Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación y Políticas Públicas. *Terra Latinoam.* 34:125-138.
- 15 De León-González, F.; Hernández, M. S.; Etchevers, J. D.; Payán, Z. F. and Ordaz, Ch. V. 2000. Short-term compost effect on macroaggregation in a Sandy soil under low rainfall in the valley of Mexico. *Soil Tillage Res.* 56:213-217.
- 16 Dendooven, L.; Patiño, Z.; Verhulst, N.; Luna, G. M.; Marsch, R. and Govaerst, B. 2012. Global warming potential of agricultural systems with contrasting tillage and residue management in the central highlands of Mexico. *Agric. Ecosyst. Eviron.* 152:50-58.
- 17 Docampo, R. 2010. La importancia de la materia orgánica del suelo y su manejo de producción frutícola. *Serie de actividades de difusión núm. 687*. Las Brujas: INIA-Estación Experimental Wilson Ferreira Aldunate. 81-88 pp.
- 18 FAO. 2017. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Conservation Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 17480:1-2.
- 19 Follett, R. F.; Castellanos, Z. J. and Buenger, E. D. 2005. Carbon dynamics and sequestration in an irrigated Vertisol in Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 83:148-158.

- 20 Franzluebbers, A. J.; Haney, R. L.; Honeycutt, C. W.; Schomberg, H. H. and Hons, F. M. 2000. Flux of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:613-623.
- 21 Fuentes, M. B.; Govaerst, C.; Hidalgo, J.; Etchevers, I.; González, M. J. M.; Hernández, H.; Sayre, K. D. and Dendooven, L. 2010. Organic carbón and stable ^{13}C isotope in conservation agriculture and conventional systems. *Soil Biol. Biochem.* 42:551-557.
- 22 Fuentes, J.; Magaña, C.; Suárez, L.; Peña, R.; Rodríguez, S. y Ortiz, B. 2001. Análisis químico y digestibilidad “*in vitro*” de rastrojo de maíz (*Zea mays* L.). *Rev. Agron. Mesoam.* 12(2):189-192.
- 23 González-Sánchez, E. J.; Ordóñez-Fernández, R.; Carbonell-Bojollo, R.; Veroz-González, O. and Gil-Ribes, J. A. 2012. Meta-analysis on atmospheric carbon capture in Spain through the use of conservation agriculture. *Soil Tillage Res.* 122:52-60.
- 24 Jury, W. A.; Gardner, W. R. and Gardner, W. H. 1991. *Soil physics.* John Wiley & Sons. New York. 328 p.
- 25 Lal, R. 2003. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. *Crit. Rev. Plant Sci.* 22:151-184.
- 26 Lal, R. 2007. Constraints to adopting no-till farming in developing countries. *Soil Tillage Res.* 94:1-3.
- 27 López, B. W.; Reynoso, R. C.; López, J. M.; Camas, R. G.; Tasistro, A. 2018. Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz en la región Fraylesca, Chiapas. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 9(1)10.29312/remexca.v9i1.848.
- 28 Martínez, G. M. A. y Osuna, C. E. S. 2017. Impacto de la agricultura de conservación en propiedades físicas del suelo y rendimiento de la rotación maíz-avena/triticale forrajero de riego. Folleto técnico. MX-0-310305-25-03-17-09-48. San Luis Potosí, México. 33 p.
- 29 Osuna-Ceja, E. S.; Figueroa-Sandoval, B.; Oleschko, K.; Flores-Delgadillo, Ma. L.; Martínez-Menes, M. R. y González-Cossío, F. V. 2006. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia* . 40:27-38.
- 30 Rachman, A.; Anderson, S.; Gantzer, C. and Thopnson, A. 2003. Influence of long-term cropping systems on soil physical properties related to soil erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:637-644.
- 31 Reicosky, D. C. 2011. Conservation agriculture: global environmental benefits of soil carbon management. In *Fifth World Congress on Conservation Agriculture.* 1:3-12.
- 32 Reynolds, W. and Elrick, D. 1990. Poned infiltration from a single ring: Analysis of Steady Flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1233-1241.
- 33 Salinas, G. J. R.; Báez, A. D. G.; Tiscareño, M. L. and Rosales, E. R. 2002. Residue removal and tillage interaction effects on soil properties under rain-fed corn production in Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 59:67-79.
- 34 Sánchez, F. A.; Marín, H. G. and Mejía, E. C. 2008. Impacts and plan of environmental management of the conventional tillage. *CES Med. Vet. y Zootec.* 3(1):36-40.
- 35 Sandoval-Estrada, M.; Stolpe-Lau, N.; Zagal-Venegas, E.; Mardones-Flores, M. y Celis-Hidalgo, J. 2008. Aporte de carbono orgánico de la labranza cero y su impacto en la estructura de un Andisol de la Precordillera Andina Chilena. *Agrociencia* . 42:139-149.
- 36 Sarabia, M. I. F.; Cisneros, R. A.; Aceves, J. D. A.; Durán, H. M. G. y Castro, J. L. 2011. Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del valle de San Luis Potosí, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27(2):103-113.
- 37 SAS 2013. *Statistical Analysis Software. Versión 9.1.3,* edit. SAS Institute Inc. Cary, N.C., USA. http://www.sas.com/en_us/software/analytics/stat.html.

- 38 SEMARNAT. 2000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. No. NOM-021-SEMARNAT-2000. Inst. Diario Oficial de la Federación, México. 85 p. <http://www.semarnat.gob.mx/node/18>.
- 39 SIAP-SADER. 2019. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. México, DF.
- 40 Udawatta, R. P.; Kremer, R. J.; Garrett, H. E. and Anderson, S. H. 2009. Soil enzyme activities and physical properties in a watershed managed under agroforestry and row-crop systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 131:98-104.
- 41 Van der Wal, A. and De Boer, W. 2017. Dinner in the dark: illuminating drivers of soil organic matter decomposition. *Soil Biol. Biochem.* 105:45-48.
- 42 Villegas, D. G.; Bolaños, M. A. y Olgún, P. L. 2001. La ganadería en México. Temas selectos de geografía de México. 1^{ra} Ed. México, DF.

Agricultura de conservación: alternativa para la mitigación del cambio climático en el altiplano semiárido de México

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 July 2023
Date accepted: 01 August 2023
Publication date: 30 August 2023
Publication date: August 2023
Volume: 14
Issue: 6
Electronic Location Identifier: e2957
DOI: 10.29312/remexca.v14i6.2957

Categories

Subject: Artículo

Palabras claves:

Palabras claves:

agricultura de conservación
cambio climático
carbono
labranza
materia orgánica

Counts

Figures: 2
Tables: 1
Equations: 0
References: 42
Pages: 0