

# CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS AGRÍCOLAS DE MÉXICO: INVESTIGACIÓN Y POLÍTICAS PÚBLICAS

## Organic Carbon in Agricultural Soils of Mexico: Research and Public Policy

Helena Cotler<sup>1‡</sup>, Mario Martínez<sup>2</sup> y Jorge D. Etchevers<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. 3000, Circuito Exterior s/n, Del. Coyoacán, Cd. Universitaria, 04510 México, D. F.

<sup>‡</sup> Autora responsable (helenacotler@gmail.com)

<sup>2</sup> Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

---

### RESUMEN

El análisis de una extensa revisión bibliográfica sobre la investigación en conservación de carbono en suelos de México muestra que prácticas de agricultura de conservación y diversos sistemas de producción tradicionales pueden incrementar de manera considerable el carbono orgánico en suelos, lo que repercute en su resistencia ante el impacto de la lluvia, mejora la tasa de infiltración y la cantidad de agua disponible, incrementa el contenido de la biomasa microbiana, disminuye la erosión y mitiga la emisión de gases de efecto invernadero. La relevancia que adquiere la calidad de los suelos en la seguridad alimentaria y en los impactos ambientales, incluyendo el cambio climático, explica la importancia de su incorporación en las políticas públicas del país. Sin embargo, la revisión de instrumentos de política pública del presente sexenio (2013-2018) expone grandes vacíos y contradicciones que se presentan a través de ejemplos concretos de acciones. El escaso presupuesto destinado a la conservación de suelos (2.12% del presupuesto total de SAGARPA en 2014) aplicado mayormente (más de 80%) a infraestructura hidráulica señala por un lado, la ausencia del reconocimiento del suelo como medio para infiltrar y retener agua; y por el otro, la incipiente incorporación de los estudios sobre carbono en suelos en los instrumentos de política pública correspondientes. Se identifican varios aspectos necesarios para mejorar la transversalidad en torno a la conservación de carbono en suelos: (i) generar políticas públicas que reconozcan las funciones y los servicios ecosistémicos que proveen los suelos, (ii) fortalecer la institucionalidad acerca del tema de suelos, (iii) incentivar los programas de conservación de suelos *in situ*, que incorporen carbono a través de la promoción de agroecosistemas adaptados a las diversas condiciones territoriales.

**Palabras clave:** *agricultura de conservación; agroecosistemas; adaptación; transversalidad.*

### SUMMARY

The analysis of an extensive literature review on research into carbon storage in soils of Mexico shows that conservation agriculture and various traditional agroecosystems can significantly increase organic carbon in soils, which in turn affects their resistance to impact raindrop, improves infiltration rate and the amount of water available, increases the content of microbial biomass, reduce erosion, and mitigate the emission of greenhouse gases. The importance acquired by the soil quality on food security and environmental impacts, including climate change, explains the importance for inclusion in public policy. However, the review of public policy instruments of the current governmental period (2013-2018) exposes large gaps and contradictions that arise through concrete examples of actions. The low budget for soil conservation (2.12% of the total budget in 2014 of SAGARPA) applied mostly (over 80%) on water infrastructure, shows on the one hand, the absence of recognition of soil as a means to infiltrate and retain water; and on the other hand, the incipient incorporation of soil carbon studies in the corresponding instruments of public policy. We identified several aspects needed to improve mainstreaming around soil carbon conservation: (i) generate public policies that recognize the functions and ecosystem services provided by soils (ii) strengthening institutionalality on the subject of soils (iii) encourage conservation programs *in situ* that incorporate carbon through the promotion of agro-ecosystems adapted to the various territorial conditions.

**Index words:** *conservation agriculture; agroecosystems; adaptation; transversality.*

---

#### Como citar este artículo:

Cotler, H., M. Martínez y J. D. Etchevers. 2016. Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación políticas públicas. *Terra Latinoamericana* 34: 125-138.

Recibido: septiembre de 2015. Aceptado: enero de 2016.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 125-138.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo institucional y el fortalecimiento académico de la ciencia del suelo en México dieron pie a la construcción de políticas públicas que definieron y marcaron la actividad agropecuaria en el país a mediados del siglo pasado (Ortiz, 1993; McIntire, 1994).

Desde entonces, los programas de conservación de suelos han estado inmersos en las políticas públicas. En un inicio, el énfasis se orientó hacia la difusión, la capacitación e implementación de diversas prácticas y obras de conservación de suelos a nivel regional (terrazas, abonos verdes, huertos familiares y módulos demostrativos), cuyos programas siempre operaron con poco presupuesto y personal (Martínez, 1999). Con el transcurso del tiempo, la esencia de los programas cambió haciendo hincapié en la construcción de obras estructurales como terrazas de diferentes tipos, pequeños bordos de almacenamiento, obras de riego y abrevaderos (Plan Benito Juárez, 1972-1982) que requirieron de manuales de conservación del suelo y agua que elaboró el Colegio de Postgraduados (Anaya *et al.*, 1991). Posteriormente (a partir de 1985) se consideró un enfoque más agronómico con los programas de labranza de conservación y del MIAF (maíz intercalado con árboles frutales) en apoyo a la conservación, producción y mejoramiento de la calidad del suelo por sus aportaciones de materia orgánica, aunque la importancia dada en términos presupuestales y humanos siguió la misma tendencia (Cotler *et al.*, 2007).

La literatura científica demuestra que los suelos proveen servicios ambientales indispensables para asegurar la seguridad alimentaria, el mantenimiento de la biodiversidad y la regulación hidrológica, entre otros. Asimismo, los suelos constituyen la mayor fuente de carbono orgánico en los ecosistemas terrestres (Batjes, 1996), pudiendo duplicar el contenido de C que se encuentra en la atmósfera (Schlesinger y Andrews, 2000). En México, el manejo de los suelos agrícolas es responsable del 6.21% de la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (SEMARNAT-INECC, 2012). La quinta comunicación nacional ante la Convención de Naciones Unidas menciona que las causas corresponden a la práctica intensiva de la labranza y el uso de fertilizantes (Presidencia de la República, 2014).

En las últimas décadas, las políticas públicas dirigidas hacia el sector agropecuario han generado numerosas externalidades negativas (Yúnez, 2010; Robles Berlanga, 2012) y han tenido influencia en el incremento de la degradación de los suelos, la cual afecta alrededor del 45% de la superficie del país (Semarnat-Colegio de Postgraduados, 2002).

La calidad de los suelos, puede ser entendida como “la condición del suelo para mantener el crecimiento de las plantas sin causar degradación de suelos o daño ambiental” (Acton y Gregorich, 1995) o bien interpretarse como la utilidad de éste “para un propósito específico en una escala amplia de tiempo”. La calidad del suelo la constituye el estado de sus propiedades dinámicas como el contenido de materia orgánica, la diversidad de organismos o los productos microbianos en un tiempo particular (Bautista *et al.*, 2004) y otros, llamados indicadores de la calidad del suelo. La intensidad y calidad de la materia orgánica que se agregue al suelo afecta, en consecuencia, la calidad del suelo, misma que será función de la tasa con que ésta pasa a formar parte del carbono orgánico del suelo (COS). El concepto de COS es amplio y va desde materiales que pasan la malla de 2mm donde son distinguibles los restos celulares, hasta productos finales de la transformación de los productos orgánicos, que son estructuras moleculares complejas que contienen abundancia de grupos fenólicos y carboxílicos con distinto peso molecular. Estas últimas modifican la calidad del suelo, al proveer sitios de capacidad de intercambio, material cementante para constituir agregados, a diferencia de las primeras que solo constituyen fuente de energía para los microorganismos. Los compuestos orgánicos son necesarios tanto para la producción agrícola como para el mantenimiento de funciones ambientales. La presencia del carbono en los suelos incide sobre la formación y la estabilización de los agregados (de León-González *et al.*, 2000) que conlleva a una mayor resistencia ante el impacto de la gota de lluvia sobre la estructura de la superficie del suelo, mejora la tasa de infiltración y la capacidad de retención de agua en el suelo, incrementa el contenido de la biomasa microbiana y del reciclaje de nutrientes (Lal, 2004).

Sin embargo, la dinámica de los almacenes de carbono y su calidad es altamente influenciada ante cualquier modificación en las prácticas de manejo (Bernoux *et al.*, 2006), sobre todo aquellas que implican

la exposición y destrucción de los agregados del suelo. En ese sentido, desde hace varias décadas hay una amplia discusión sobre los impactos que la labranza convencional 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 materia orgánica que está ocluida en pequeños agregados (Matus, 1994), la cual puede oxidarse como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Robert, 2001; Bedard-Haughn *et al.*, 2006); mientras que cuando los residuos se quedan en la superficie del suelo, su incorporación se realiza mediante la actividad de la edafofauna, sin rompimiento de agregados, donde la materia orgánica puede permanecer inmovilizada (Dendooven *et al.*, 2012). En México, el cultivo de maíz, que cubre más del 60% de las tierras de temporal (SIAP-SAGARPA, 2014) está sujeto, en su mayoría, a una labranza convencional. En este sistema los suelos quedan desnudos más de seis meses después de la cosecha, ya que los residuos aéreos son removidos para alimento del ganado, como pastoreo directo o bien son quemados. La pérdida de la materia orgánica conlleva a una pérdida de fertilidad, a la reducción de la capacidad de retención de humedad y la pérdida de productividad, lo cual se refleja en la necesidad de aumentar la aplicación de fertilizantes para mantener los rendimientos (Harrington, 1996; Govaerts *et al.*, 2006; Alonso y Aguirre, 2011). Es así que quizás uno de los grandes problemas que enfrentan los agricultores al laborear el suelo es la paulatina pérdida de materia orgánica (Crovetto, 1996).

Por otro lado, la agricultura juega un papel importante en los flujos de dióxido de carbono y por ello, puede convertirse en un medio para desacelerar la emisión de gases de efecto invernadero (García *et al.*, 2015) a través del secuestro de carbono por sistemas agrícolas sustentables (Robertson *et al.*, 2000). Para ello es necesario identificar las mejores prácticas de manejo por agroecosistema que conlleven al secuestro y a la estabilización del carbono en el suelo (García *et al.*, 2015).

Actualmente es ampliamente reconocido que la adopción de la agricultura de conservación puede incrementar el contenido de carbono en los suelos, al reducir su movimiento para la siembra, mantener una cobertura vegetal permanente o semi-permanente sobre la superficie del suelo y promover la rotación de cultivos, además de generar numerosos beneficios agronómicos, como el control de malezas y plagas y,

el enriquecimiento de nutrientes (Follett *et al.*, 2005; Fuentes *et al.*, 2010; Castellanos-Navarrete *et al.*, 2012). Esta “nueva” técnica retoma el conocimiento de diversas prácticas tradicionales que permiten la incorporación de carbono como medio para mejorar la calidad de los suelos. Entre ellas se encuentran los sistemas de milpa, cuya estructura y funcionamiento la caracterizan como resiliente y agrodiversa (Pool *et al.*, 2000; Pulido y Bocco, 2003; Arnés *et al.*, 2013; Bermeo, 2014) y otros sistemas agrosilvopastoriles adaptados al contexto socioambiental de diferentes regiones del país (Vergara-Sánchez *et al.*, 2004; Mendoza y Messing, 2005; Reyes-Reyes *et al.*, 2007; Flores-Delgadillo, 2011; Nahed-Toral *et al.*, 2013; Astier *et al.*, 2014).

Teniendo antecedentes de estudios que muestran que tanto sistemas de producción tradicionales como sistemas de agricultura de conservación conservan, en una determinada proporción, la materia orgánica en los suelos es importante identificar si los programas de política pública en México están promoviéndolos como medio para conservar la calidad de los suelos agrícolas y con ello promover el incremento de los rendimientos, la disminución de los procesos de erosión y la mitigación de la emisión de gases de efecto invernadero.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se procedió a una revisión de literatura en revistas internacionales y nacionales sobre los resultados experimentales y en campo de prácticas de conservación de suelos implementadas en áreas agrícolas en el territorio mexicano. La búsqueda consideró estudios que comparativamente hayan mostrado el impacto de la práctica de conservación sobre el contenido de carbono orgánico del suelo en el transcurso de varios años. Esta búsqueda se realizó a través de las palabras claves de “conservación de suelos”, “carbono” y “México” (en inglés y español).

Por otro lado, se revisó la literatura sobre políticas públicas relacionadas con temas agrícolas, ambiental y de cambio climático. Para ello se consideraron los instrumentos de política pública del presente sexenio (2013-2018), como el Programa Sectorial de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2013) y en específico el presupuesto desglosado del 2014 de esta Secretaría, el Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2013), la Estrategia Nacional

de Cambio Climático (ENCC) (SEMARNAT, 2013a) y el Programa Especial de Cambio Climático (Presidencia de la República, 2014).

## RESULTADOS

Al igual que los estudios sobre erosión de suelos en México (Cotler *et al.*, 2010), los estudios sobre conservación de suelos se han realizado desde hace varias décadas. Entre ellos, se ha hecho hincapié de su impacto sobre la reducción de la erosión y los cambios sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos. Sin embargo, los trabajos relacionados con conservación de suelos y su efecto sobre la dinámica del carbono son relativamente recientes. Estos trabajos pueden dividirse en dos grandes grupos. Por un lado, se encuentran aquellos que se realizan principalmente en parcelas experimentales (CIMMYT, INIFAP, FIRA), ubicadas en el centro, occidente y norte de México, donde se han implementado diversos tipos de labranza de conservación con los cultivos dominantes de la región. Por otro lado, se cuentan con estudios basados en sistemas de producción tradicionales, realizados en campo, en diversos sitios del país. El conjunto de estos análisis permiten abarcar un amplio espectro de agroecosistemas.

Para el presente artículo se incluyeron diez trabajos sobre labranza de conservación y seis sobre sistemas de producción tradicionales y sus respectivos efectos sobre los cambios en los contenidos de carbono (Figura 1 y Cuadro 1).

### De los Casos de Labranza de Conservación

La mayoría de los estudios experimentales relacionados con la labranza de conservación se han implementado en climas templados con cultivos de cereales, en condiciones de temporal y de riego, sobre los tipos de suelos más utilizados en la agricultura, como Vertisoles, Pheozems y Andosoles. En todos los casos, los resultados muestran un mayor contenido de carbono orgánico del suelo (COS) en los tratamientos con labranza de conservación, ya sea labranza cero, mínima o siembra directa. En la región central de México este incremento puede alcanzar más del 40% de COS después de 6 años (Salinas-García *et al.*, 2012) o una tasa de incremento de COS de  $0.2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Follet *et al.*, 2005).

Este incremento está directamente relacionado con la acumulación en superficie de los residuos de cultivos que al disminuir su contacto con los microorganismos del suelo ocasiona una descomposición más lenta



Figura 1. Ubicación de casos de estudio seleccionados.

**Cuadro 1. Casos de agricultura de conservación y agroecosistemas tradicionales y, sus respectivos efectos sobre los cambios en los contenidos de carbono.**

Sitio	Clima	Tipo de suelo	Sistema	Resultados en relación a COS	Fuente
Sistemas de labranza de conservación					
Casas Blancas, Morelia, Apatzingán, Tepatitlán (Michoacán)	Tropical seco (650 mm) a templado subhúmedo (1100 mm). Altitud: 330-2400 m	Vertisol, Andosol, Alfisol	Maíz de temporal. Tratamientos en parcelas experimentales (6 años): Labranza convencional, Mínima labranza (ML) y no labranza (NL).	El COS incrementa con tratamientos ML y NL. La biomasa microbiana del suelo C y N fue 25 y 50% superior en NL y ML que en la labranza convencional.	Salinas <i>et al.</i> , 2002
El Batán, Texcoco (Estado de México), CIMMYT	Semi-árido subtropical, 600 mm. Altitud: 2240 m	Phaeozem cumúlico	Rotación cebada-trigo-maíz. Tratamientos en parcelas experimentales (12 años): Sin labranza con residuos; sin labranza y sin residuos; labranza tradicional.	El COS es mayor en tratamiento sin labranza y con residuos.	Govaerts <i>et al.</i> , 2006
El Batán, Texcoco (Estado de México), CIMMYT	Semi-árido subtropical, 626 mm. Altitud: 2240 m	Phaeozem cumúlico	Tratamientos en parcelas experimentales de 13 años. Agricultura de conservación: rotación maíz-trigo con residuos (CA), maíz con labranza tradicional con residuos (LT-res); maíz con labranza tradicional sin residuos (LT).	El contenido de N y COS es mayor en los primeros 5 cm en el sistema de agricultura de conservación.	Castellanos <i>et al.</i> , 2012
Ajuno, Pátzcuaro (Michoacán), INIFAP	1000 mm. 14.5 °C	Andosol	Parcelas tipo USLE con 7 tratamientos: labranza tradicional (LT); sin labranza con distintos porcentajes de residuos (0, 33, 66, 100%) y 33% con frijol, 33% con vicia.	El contenido de COS incrementó con todos los tratamientos que incorporaron residuos y no fue influenciado por el cultivo de leguminosas. Estos mismos tratamientos incrementaron las fracciones solubles de C.	Roldan <i>et al.</i> , 2003
Celaya (Guanajuato), INIFAP	Semi-árido subtropical	Vertisoles	Parcelas experimentales (5 años) con 5 tratamientos de distintas rotaciones de trigo-maíz y labranza tradicional sin residuos, con residuos, sin labranza, sin labranza con residuos y sin labranza.	El mayor contenido de COS se obtuvo con rotación sin labranza entre los 15-30 cm de profundidad. Se observó un efecto beneficioso de la fertilización de N.	Follett <i>et al.</i> , 2005
Guanajuato (Guanajuato), FIRA	Cálido y seco, 673 mm. Altitud: 1719 m	Vertisol districo	Parcelas experimentales con 4 tratamientos: labranza convencional, y tres tipos de labranza cero, de 1, 3 y 11 años.	El contenido de materia orgánica fue superior en las parcelas de labranza cero, apreciándose una estratificación.	Ramírez-Barrientos <i>et al.</i> , 2006
Guanajuato (Guanajuato), FIRA	Cálido y seco, 673 mm. Altitud: 1719 m	Vertisol districo	Parcelas experimentales con 4 tratamientos (9 años): siembra directa con aporte total de rastrojos de maíz (SDR) y aporte parcial (SDE); siembra convencional con quema de los residuos (SCQ) y suelo no cultivado (SNC) como referencia.	Las mayores reservas de COS y fracciones húmicas en la capa de 0 a 15 cm resultaron en SNC; sin diferencia estadística del COS entre SNC y SDE. Los ácidos fúlvicos alcanzaron 70% en SDR. La SDE ha incrementado la MOS en 1% respecto a SCQ.	García-Silva <i>et al.</i> , 2006
Región El Soconusco: Tapachula, Tuxtla Chico y Frontera Hidalgo (Chiapas)	Cálido- húmedo, 1300-1850 mm		Sitios experimentales (2 años) con 3 tratamientos de maíz con: labranza cero (CL), labranza mínima (LM) y labranza convencional (LC).	No hubo diferencia significativa entre los tratamientos. Acumulación de materia orgánica a partir de los 10 cm de profundidad	Báez <i>et al.</i> , 2011

**Cuadro 1. Casos de agricultura de conservación y agroecosistemas tradicionales y, sus respectivos efectos sobre los cambios en los contenidos de carbono (continuación).**

Sitio	Clima	Tipo de suelo	Sistema	Resultados en relación a COS	Fuente
Casas Blancas (Lago Zirahuen-Michoacán)	Subhúmedo, 1100 mm. Altitud: 2298 m	Andosol húmico y ócrico	Sitios experimentales (2 años) con cultivo de maíz y abonos verdes con 5 tratamientos de labranza: convencional (Conv); Conv con vicia; Conv con cebada; sin labranza con vicia; sin labranza con cebada.	Los suelos sin labranza tuvieron un mayor contenido de COS, la misma tendencia se observó con el N. No se distinguió efecto de abonos verdes (cebada).	Astier <i>et al.</i> , 2006
Norte de Tamaulipas	Subtropical cálido, 635 mm	Vertisoles	Parcela experimental (3 años) con cultivo de maíz, con 4 tratamientos de labranza, 3 de ellas convencionales y uno sin labranza, con riego y sin riego.	Los suelos sin labranza y con riego presentan el mayor contenido de MO en los primeros 5 cm, debajo de los cuales la MO disminuye independientemente del sistema de labranza y de riego.	Roldan <i>et al.</i> , 2005
Sistemas productivos tradicionales					
Guanajuato, Salamanca, Yustis y Abasolo (Guanajuato)	600-700 mm	Vertisol éutrico	Rotación de cultivos: alfalfa semipermanente (labranza cada 4-5 años); sorgo-trigo con riego; brócoli-sorgo con riego; cebolla-zanahoria-calabaza con riego; maíz de temporal. Cada sitio tiene una réplica no cultivada.	El mayor contenido de COS se encuentra en cultivo de alfalfa y el menor en cultivo de maíz de temporal, la misma tendencia sigue el N total. Los mayores valores de COS se encuentran en los sitios no cultivados.	Oleshko <i>et al.</i> , 1996
San Antonio, San Luis Potosí	Cálido subhúmedo, 1642 mm	Rendzinas	Grupo indígena Teenek: cronosecuencia de cultivo de caña de azúcar: 20, 25, 43, 48 y 50 años y bosque de > 100 años.	El COS (0-20 cm) es mayor en bosque y menor en parcelas de 20 años. No hay diferencias en parcelas de 48 y 50 años. En los sitios de 43 y 50 años la relación C/N fue mayor en microagregados.	Anaya y Huber, 2015
La Fraylesca (Chiapas)	Subhúmedo, 800-1500 mm	Cambisol mólico	Lotes de escurrimiento (Wischmeier) donde se intercalaron prácticas del sistema tradicional: pastoreo bovinos, quema residuos de cosecha y parcela con frijol terciopelo.	Disminución de MO con quema de residuos.	López y Anaya, 1994
Atécuaro, Cuitzeo (Michoacán)	Templado, 800 mm	Andosoles y Acrisoles	Parcelas experimentales (2 años): Tradicional (T)-rotación con poca fertilización, tradicional mejorado(TM)-mulch y fertilización moderada; orgánico (TO)- rotación y abonos orgánicos, rotación (O)-pastoreo y cebada.	El mayor contenido de COS se dio en TO por la adición de abonos y compost. El contenido de C disminuye con el tamaño de los agregados, donde el C se encuentra fuertemente humificado. En sistemas tradicionales y de rotación (O) el contenido de humina disminuye causando la pérdida de C.	Covaleda <i>et al.</i> , 2006
Valle Amatlán	Cálido subtropical, 800-1000 mm	Luvisoles ócricos y vérticos	Cultivo de Agave tequilana: con y sin labranza, con y sin pastoreo, con aplicación de vinazas y zona no cultivada.	Contenido mayor de COS en sitios sin labranza.	Gobeille <i>et al.</i> , 2006

de la materia orgánica (Salinas-García *et al.*, 2002), aumentando la cantidad de COS retenido (Follet *et al.*, 2005). El incremento de COS es notorio en los primeros centímetros de suelo (Salinas-García, 2002; Follet *et al.*, 2005; Roldan *et al.*, 2005; Fuentes *et al.*, 2010; Castellanos-Navarrete *et al.*, 2012), pudiendo llegar a tener 1.8 veces más COS en los primeros veinte centímetros, comparado con la labranza tradicional (Dendooven *et al.*, 2012), a partir del cual se observa una estratificación vertical del COS que favorece la formación y estabilización de agregados (Castellanos-Navarrete *et al.*, 2012). Diversos estudios muestran la necesidad de monitorear el COS en experimentos de larga duración, ya que los cambios son lentos y difíciles de detectar (Roldan *et al.*, 2005).

En periodos menores de 10 años los cambios de COS son relativamente pequeños comparados con el tamaño de este almacén (Smith, 2003; González Medina *et al.*, 2014). En México, los experimentos de los cambios del COS son de corta duración (González-Molina *et al.*, 2011), aunque los experimentos de labranza de conservación han mostrado resultados después de 5 años, mientras que en los estudios menores de 2 años no se observan diferencias significativas (Alonso y Aguirre, 2011).

Al retener una mayor cantidad de carbono orgánico en el suelo, la agricultura de conservación tiene el potencial de reducir la emisión de CO<sub>2</sub>. Dendooven *et al.* (2012) estiman que la conversión de 2 millones de hectáreas de cultivos bajo labranza tradicional en el centro de México hacia agricultura de conservación podría permitir el secuestro neto de 106 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Sin embargo, como mencionan estos mismos autores aún se requiere afinar el entendimiento sobre la interacción entre los flujos de GEI (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) bajo distintos sistemas de labranza.

En el corto plazo se han observado diferencias entre los sistemas de labranza de conservación y tradicional en términos de rendimiento, lo cual se ha atribuido al efecto físico de los residuos sobre la superficie que incide en la reducción de la escorrentía y la disminución en el rompimiento de los agregados (Romero-Perezgrovas *et al.*, 2014). Asimismo el aumento de las fracciones solubles de C (Roldán *et al.*, 2003) que constituyen la principal fuente de energía de la actividad metabólica permite el incremento de biomasa microbiana (Salinas *et al.*, 2002). La fauna edáfica también se ve beneficiada, en términos de

la abundancia de lombrices (Follett *et al.*, 2005; Govaerts, 2009; Rosas-Medina *et al.*, 2010; Alonso y Aguirre, 2011; Castellanos-Navarrete *et al.*, 2012). Finalmente, al encontrarse el suelo protegido, cubierto con residuos, con mayor contenido de materia orgánica que repercute en una mejor agregación, la erosión de suelos se ha visto reducida hasta en un 80% (Tiscareño *et al.*, 1999), los rangos extremos de temperatura del suelo se encuentran mejor regulados (Dendooven *et al.*, 2012) y se incrementa el contenido de agua en el suelo (Rosas-Medina *et al.*, 2010). Estos efectos son especialmente importantes en periodos de sequía, escenario común para diferentes regiones del país (Cavazos *et al.*, 2013) así como ante el incremento de lluvias intensas (Groisman *et al.*, 2006).

A partir de los resultados obtenidos, diversos autores afirman la necesidad de implementar esta tecnología en las tierras agrícolas del centro, como medio para mejorar la calidad de los suelos (Salinas-García *et al.*, 2002; Roldan *et al.*, 2003; Govaerts *et al.*, 2009), incrementar el rendimiento y reducir los costos de producción (Perezgrovas *et al.*, 2014), controlar la erosión de suelos y aumentar la eficiencia del uso de agua (Govaerts *et al.*, 2006).

En México, hay experiencias de aplicación de labranza de conservación cero desde hace 20 años; sin embargo su adopción ha sido lenta (FIRA, 2008). Como resultado de la Encuesta Nacional Agropecuaria, INEGI (2012) reportó que el 22% de las unidades de producción utilizaban tecnología de labranza de conservación. Sin embargo, las experiencias sobre encuestas acerca de esta tecnología en otros países (Uri, 2000) hace constar las malas interpretaciones y percepciones erróneas que se mantienen entre los agricultores sobre el mismo concepto de labranza de conservación, por lo que sería necesario afinar este resultado en las siguientes encuestas.

Si bien estos estudios han mostrado los diversos beneficios ecológicos, económicos y ambientales de la agricultura de conservación, también se han mencionado ciertas limitaciones que sugieren que esta práctica no es una panacea (Roldan *et al.*, 2003; Lal, 2007; García Franco *et al.*, 2015). En agroecosistemas donde hay una fuerte competencia por el uso de los residuos de cultivo (para alimento de ganado, como producto de venta o como cobertura de suelo), la adopción de la agricultura de conservación requiere una conversión progresiva de todo el sistema de producción (Beuchelt *et al.*, 2015).

## De los Sistemas de Producción Alternativos

A diferencia de los estudios de sistemas de labranza, los sistemas de producción alternativos han sido analizados en condiciones de campo, donde el uso de cronosecuencias posibilitó conocer el impacto de estos sistemas a largo plazo. De este modo se puede reconocer que cultivos tradicionales de caña de azúcar, sin quema ni labranza, después de 50 años, pueden mantener los mismos niveles de COS que los sitios forestales aledaños, sugiriendo la resiliencia de este sistema (Anaya y Huber-Sannwald, 2015).

En prácticamente todo el país, los sistemas de producción mixtos (agricultura-ganadería) es una constante. En algunas regiones, se han desarrollado y adaptado sistemas silvopastoriles que incorporan materia orgánica a los suelos al mismo tiempo que proveen diversos bienes y servicios a la sociedad (Nahed-Toral *et al.*, 2013).

En el trópico húmedo, el incremento del periodo de descanso puede aumentar de 0.5 a 0.6% de materia orgánica al año (Mendoza-Vega *et al.*, 2005), mientras que el manejo tradicional de los solares ha logrado que la adaptación de cultivos repercuta en incrementos de COS (Flores-Delgadillo *et al.*, 2011) y de macroinvertebrados (Huerta y van der Wal, 2012).

## Política de Conservación de Carbono en Suelos

**Políticas públicas del sector agrícola.** El diagnóstico sobre el sector agrícola, sus potencialidades, sus problemas y los modos de enfrentarlos a nivel país están expuestos en el Programa Sectorial de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2013). El programa plantea como desafío “el incremento de la producción alimentaria a través de mayor productividad” (p.51), estableciendo grandes limitaciones e hipótesis para lograrlo como: (a) la necesidad de usar más y de manera más adecuada los fertilizantes (pp. 55 y 67), (b) el elevado número de unidades económicas rurales de subsistencia (72.6%) y el minifundismo: 80% de las parcelas son menores a 5 ha (p. 59) y (c) la ausencia de riego, ya que el 74% de la superficie agrícola se cultiva en temporal (pp. 59, 66). Además de la pobreza, el financiamiento escaso, la vulnerabilidad a riesgos climáticos, sanitarios y de mercado y la degradación de los recursos naturales. Sin embargo, no se especifican las causas, consecuencias ni las formas de degradación de los suelos. A partir

de este análisis el Programa de SAGARPA define sus “pilares de cambio” y de ellos se desglosan los programas de política pública.

En el Programa Sectorial se menciona como gran limitante la fertilidad, haciendo eco a los resultados mostrados por la Encuesta Nacional Agropecuaria (INEGI, 2012) donde se menciona que el 48.61% de las unidades de producción identifican a la pérdida de fertilidad como el principal problema en el desarrollo de actividades agropecuarias. Ante lo cual el Programa plantea: “con el adecuado uso de fertilizantes se pueden producir más alimentos y compensar la baja fertilidad en particular de los suelos que han sido sobreexplotados” (SAGARPA, 2013: 67).

La literatura científica definía tradicionalmente el suelo fértil como aquél que tiene la capacidad de abastecer de nutrientes suficientes al cultivo, asegurando su crecimiento y desarrollo (Brady y Weil, 1990). Sin embargo, el reconocimiento de las numerosas funciones que cumple el suelo en los agroecosistemas impulsó a redefinir de manera más integral este concepto, “como aquél que conserva las propiedades físicas, químicas y biológicas deseables mientras que abastece adecuadamente de agua y de nutrientes y provee sostén mecánico para las plantas” (Astier *et al.*, 2002). Para agricultura de temporal también puede incluirse la maximización de la productividad pluvial mientras se minimiza los impactos relacionados con erosión de suelos y pérdida de carbono (Castellanos-Navarrete *et al.*, 2012).

En el Programa Sectorial, los suelos no son reconocidos como soporte de la producción agrícola y pecuaria, como medio de infiltración del agua de la lluvia, como hábitat de microorganismos que posibilitan los ciclos biogeoquímicos y la vida en general y por ende, de las soluciones que deben abordarse para mejorar la productividad agrícola y disminuir su vulnerabilidad.

La paradoja de querer solucionar la fertilidad sin mencionar las funciones múltiples de los suelos o bien considerándolos como medios inertes se traduce en los componentes y acciones de este Programa, donde el énfasis está orientado principalmente a agroincentivos, tecnificación de riego, bioenergía, producción intensiva e incentivos económicos.

El Programa Sectorial consta de 9 programas y 61 componentes, de ellos solo pueden reconocerse tres que directa o indirectamente se refieren a la conservación de suelos: Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua (COUSSA), Proyecto Estratégico de Seguridad

Alimentaria (PESA) y Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional (MASAGRO).

La asignación de presupuesto a los programas constituye un indicador de las prioridades a nivel nacional. En el año 2014, el presupuesto de la SAGARPA fue histórico, alcanzando un total de 82 mil 900 millones de pesos (Cámara de Diputados, 2014), mientras que el presupuesto ejercido bajo el rubro de conservación de suelos y agua (COUSSA) fue solo de mil 761 millones de pesos es decir el 2.12%. Si se consideran los programas de PESA y MASAGRO el monto total dedicados a prácticas de conservación sube a 6.72% (MASAGRO recibió 582.1 MDP y PESA 3230 MDP). Como medio de sistematizar las acciones de conservación de suelos enlistadas se conformaron tres categorías distintas, a saber infraestructura hidráulica, acciones que incorporan biomasa al suelo y acciones mecánicas (o estructurales). Al revisar la elección de las acciones de conservación de suelos constatamos que éstas se enfocan principalmente hacia la infraestructura hidráulica, indistintamente de la región ecológica (Cuadro 2). En términos de prácticas que potencialmente puedan incorporar materia orgánica al suelo (componente II), los presupuestos son los más bajos.

La decisión de invertir un mayor presupuesto en infraestructura hidráulica se fundamenta en la premisa del programa sectorial donde se afirma que “el incremento de la productividad se apoya en el uso eficiente y sustentable del agua, así como en la expansión de la superficie de riego” (p.79).

Esta estrategia de apoyo al campo sugiere que la presencia de agua permitirá el crecimiento y

**Cuadro 2. Presupuesto dedicado a acciones de conservación de suelo y agua (en porcentaje) por región y componente<sup>†</sup>.**

Región/Componente	I	II	III
	- - - - - % - - - - -		
Norte	91.28	1.41	7.31
Altiplano	86.30	5.50	8.20
Trópico seco	90.12	3.00	6.88
Trópico húmedo	93.30	3.14	3.56

Componente I: infraestructura hidráulica = presas, bordos, aljibes, perforación de pozos, sistemas de riego, obras de drenaje. Componente II: adquisición de plantas para reforestación, repastización, barreras vivas. Componente III: control de cárcavas, terrazas, zanjas, rodillo aireador, geo-membrana, presas filtrantes. <sup>†</sup> Información proporcionada por la Dirección General de Producción Rural Sustentable en Zonas Prioritarias-Subsecretaría de Desarrollo Rural (30 de junio del 2015).

la sostenibilidad del cultivo independientemente de la calidad de los suelos. Esta premisa contradice una amplia y diversa literatura científica, donde queda establecida la relación positiva entre la calidad de suelos y la productividad y, la relación inversa entre la erosión de suelos y la productividad (Pimentel *et al.*, 1995; Scherr y Yadav, 1996; Bakker *et al.*, 2004; Delgado *et al.*, 2013).

### Políticas Públicas del Sector Ambiental

Las prioridades, estrategias y líneas de acción del sector ambiental se describen en el Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2013). En este documento se menciona la degradación de suelos como una de las causas de la pérdida del capital natural. Ante ello se establecen dos líneas de acción relacionadas con la gestión integrada y sustentable del agua (Estrategia 3.1) y restauración de ecosistemas (Estrategia 4.1), en ambas se promueve reforzar las acciones de conservación de suelos. A través de estas acciones se busca que el costo de la degradación de suelos, en términos de porcentaje del PIB podría reducirse del 0.47% (línea base 2013) al 0.46% (meta del 2018).

La ausencia del reconocimiento del suelo como medio para infiltrar, captar y retener agua, sustentado por una amplia literatura científica también es notoria en las acciones de conservación en suelos forestales, donde más del 70% de las acciones de conservación de suelos son obras estructurales, como zanjas, lo cual genera fuertes impactos sobre la pérdida de materia orgánica en los suelos (Vargas y Vanegas, 2012; Cotler *et al.*, 2015).

A pesar de que los suelos constituyen el sustento de los ecosistemas terrestres y se reconoce su importancia para la adaptación al cambio climático, su atención no dispone de las estructuras, instituciones y presupuesto que cuentan los temas como biodiversidad o cambio climático, los cuales a su vez no incorporan la conservación de suelos como tema prioritario.

### Políticas Públicas de Cambio Climático

Siendo el cambio climático un fenómeno generado por la actividad de muchos sectores productivos se estableció un marco institucional para las acciones de adaptación y mitigación a nivel nacional, donde se ubican dos instrumentos operativos: el primero

de mediano y largo plazo, la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) y el segundo de corto plazo, el Programa Especial de Cambio Climático (PECC).

A largo plazo, en la Estrategia (ENCC) se consideran a los suelos en su relación con la seguridad alimentaria ante las amenazas climáticas (A1.7) y con la vulnerabilidad ante el cambio climático (A3.1) (SEMARNAT, 2013a).

Para alcanzar estas metas, el Programa Especial de Cambio Climático (Presidencia de la República, 2014) menciona las acciones que se implementarán a corto plazo. Si bien el diagnóstico de este programa identifica la participación del sector agrícola en la emisión de GEI a través de la “utilización de fertilizantes sintéticos, las quemadas agrícolas y ruptura de agregados del suelo por el uso de maquinaria” (p. 35), solo establece una línea de acción (Estrategia 2.4-línea 2.4.6) que consiste en “Diseñar un instrumento de fomento para incrementar reservorios de carbono en los suelos” (p.55), a partir de lo cual genera un indicador en el tema de “Calidad de suelos, incluyendo su contenido de carbono”. Sin embargo, como ya se ha visto el tema de la calidad de los suelos, incluyendo la captura de carbono, se encuentra ausente de los programas y acciones del sector agrícola y ambiental.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La investigación en México sobre conservación de carbono en suelos sugiere que a través de los sistemas agroforestales tradicionales y los sistemas de agricultura de conservación es posible mejorar la calidad de los suelos, mediante el incremento del contenido de carbono (Salinas-García *et al.*, 2002; Roldan *et al.*, 2003; Follett *et al.*, 2005; García-Silva *et al.*, 2006; Ramírez-Barrientos *et al.*, 2006; Fuentes *et al.*, 2010; Dendooven *et al.*, 2012; Nahed-Toral *et al.*, 2013; Anaya y Huber-Sanwald, 2015), la conservación de la humedad de los suelos y el aumento de la eficiencia del uso de agua (Govaerts *et al.*, 2006), la reducción de los costos económicos (Romero-Perezgrovas *et al.*, 2014); la mejora de la gobernanza de la tierra (Pulido y Bocco, 2003); la reducción de la erosión de suelos y el control de malezas (Flores-Delgadillo *et al.*, 2011) y, el incremento de la edafofauna (Castellanos-Navarrete *et al.*, 2012; Huerta y van del Wal, 2012).

Estas prácticas ambientales y de conservación determinan que estos agroecosistemas presenten una mayor resiliencia ante fluctuaciones climáticas, una

recuperación productiva más rápida ante huracanes y sequías (Altieri *et al.*, 2015) y una disminución de la emisión de gases de efecto invernadero (Lal, 2004).

La relevancia que adquiere la calidad de los suelos en la seguridad alimentaria y en los impactos ambientales, incluyendo el cambio climático explica la importancia de su incorporación en las políticas públicas del país. Sin embargo, la revisión de los principales instrumentos de política pública que deberían atender a los suelos, en términos agrícola, ambiental y de cambio climático deja en claro que la incorporación de un concepto moderno de suelo en estos instrumentos es una tarea pendiente y son todavía incipientes las propuestas de manejo encaminadas hacia el mantenimiento de las funciones ambientales y productiva de los suelos. Cada sector de la sociedad y del gobierno tiene una finalidad distinta en relación a los suelos: incrementar la productividad, conservar ecosistemas y disminuir GEI, lo cual realizan sin tomar plenamente en cuenta los estudios realizados que señalan que el contenido de materia orgánica en los suelos posibilitaría que éstos puedan cumplir con esa diversidad de objetivos.

La atención hacia la conservación de suelos agrícolas está formulada a través de programas, con finalidades distintas y dispersos en el territorio que buscan paliar el problema de la conservación de suelos, más no atienden las causas estructurales que conllevan a su degradación. Además de no incorporar los resultados de los estudios, estos programas mencionan acciones contrapuestas. Por ejemplo, el sector agrícola propone recuperar la fertilidad de los suelos mediante el uso exclusivo de fertilizantes mientras que en el PECC se identifica a estos insumos como fuente de GEI, que México está comprometido a disminuir.

Si bien a largo plazo la ENCC considera importante atender los suelos por su relación con la seguridad alimentaria y su vulnerabilidad ante el cambio climático, las acciones a corto y mediano plazo, señaladas en el PECC, no abonan en esa dirección. Ya que si bien se plantea la necesidad de monitorear el carbono en los suelos, este indicador no está respaldado por las acciones realizadas por los sectores agrícola y ambiental, quienes no consideran prioritario el impulso a prácticas que incorporen carbono al suelo. Por otro lado, en estos dos sectores el entendimiento de la conservación de suelos se ha orientado hacia la construcción de infraestructura, principalmente hidráulica, donde se concentra el poco presupuesto asignado para la conservación de suelos. Esta tergiversación puede explicarse por la necesidad

de mostrar obras como indicador de desempeño de los programas y también por la ausencia del reconocimiento de los suelos como medio imprescindible de retención y almacenamiento del agua.

La revisión de estos programas hace evidente, una vez más, la necesidad de realizar diagnósticos claros, elaborados con bases científicas, que coadyuven hacia la coordinación y posibiliten que “la transversalidad ambiental se convierta en una práctica cotidiana en todos los niveles de la gestión pública” (Sarukhán *et al.*, 2012). La transversalidad para el caso de los suelos presenta un obstáculo adicional como resultado de la atomización de las atribuciones, las cuales se encuentran distribuidas entre diversas instituciones federales (INEGI, SAGARPA, SEMARNAT, CONAFOR, SEDATU, PROFEPA) y estatales. Ante este escenario urge la presencia de una institución que oriente, guíe y priorice las necesidades en términos de conservación de suelos y su posterior evaluación, lo cual podría facilitar la comunicación y la coordinación entre estas instituciones.

En México la conservación de suelos se ha realizado a través de distintas modalidades, con incentivos económicos, planeación participativa, módulos demostrativos donde se han construido infraestructura hidráulica y obras estructurales, además de la implementación de prácticas agronómicas. A pesar de este esfuerzo casi la mitad de los suelos del país están degradados, causando importantes impactos socioambientales. Este resultado tendría que llevar a evaluar, de manera crítica, las experiencias y los programas para reorientar la política de conservación de suelos del país. Es importante incorporar en la política la diversidad cultural y socio-económica del sector agrícola, reconocer el conocimiento local que durante mucho tiempo se ha generado, añadir la visión de agroecosistemas complejos en los programas, evitando el abordaje a través de sus componentes, concebir la noción de manejo adaptativo en la conservación de suelos, promoviendo la capacitación, la demostración y la evaluación de los resultados, ya que al final de cuentas es solo a través del interés de los dueños de la tierra que la conservación se podrá llevar a cabo.

El rediseño de las políticas públicas agrícolas y ambientales debería iniciar por un lado, por el reconocimiento de la importancia de las funciones de los suelos, tanto para la provisión de alimentos, como de captura de carbono, regulación hidrológica, conservación de la biodiversidad y sustento de

ciclos biogeoquímicos, tal como está establecido en la Estrategia de Protección del Suelo de la Unión Europea y, por otro lado, por el reconocimiento de la importancia de la conservación de la calidad de los suelos, a través de agroecosistemas sustentables para promover la mitigación y la adaptación ante el cambio climático (Delgado *et al.*, 2013; Lal, 2014).

La mayoría de las tierras agrícolas en temporal en México se encuentran bajo un sistema de producción de labranza intensivo que ha llevado a la pérdida de fertilidad de los suelos, la disminución de la capacidad de retención de agua y el detrimento de la estabilidad estructural, facilitando procesos erosivos que obligan a los productores a incrementar el uso de fertilizantes para mantener la producción, a costa del incremento de los costos de producción y de los impactos ambientales (Harrington, 1996; García-Silva *et al.*, 2006). La transición hacia una agricultura de conservación requerirá de una conversión progresiva de todo el sistema agropecuario, ya que exige un cambio drástico del uso de residuos de cosecha, los cuales se encuentran de por sí, bajo fuertes presiones (Beuchelt *et al.*, 2015). Bajo condiciones de escasa posibilidad de inversión, poca capacitación y condiciones marginales, estos cambios son muy difíciles de asumir sin una política transversal e integral.

La transversalidad en torno a la conservación de carbono en suelos debe conducir a las políticas agrícolas, ambientales y de cambio climático a incentivar los programas de conservación de suelos *in situ*, que protejan el suelo en su sitio de origen e incorporen carbono; la promoción de agroecosistemas adaptados a las diversas condiciones territoriales y el impulso al desarrollo de prácticas de conservación de suelos que hagan eficiente el uso del agua y que promuevan la mitigación de emisión de gases de efecto invernadero.

## LITERATURA CITADA

- Acton, D. F. and L. J. Gregorich. 1995. Understanding soil health. pp. 5-10. *In*: D. F. Acton and L. J. Gregorich (eds.). The health of our soils: Toward sustainable agriculture in Canada. Centre for Land and Biological Resources Research. Ottawa, Canada.
- Alonso Báez, M. y F. J. Aguirre M. 2011 Efecto de labranza de conservación sobre las propiedades del suelo. *Terra Latinoamericana* 29: 113-121.
- Altieri, A. M., C. I. Nicholls, A. Henao, and M. A. Lana. 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agron. Sustain. Dev.* 35: 869-890.

- Anaya, A. C. and E. Huber-Sannwald. 2015. Long-term soil organic carbon and nitrogen dynamics after conversion of tropical forest to traditional sugarcane agriculture in East Mexico. *Soil Tillage Res.* 147: 20-29.
- Anaya, M., M. Martínez, A. Trueba, B. Figueroa y O. Fernández (coords.). 1991. Manual de conservación del suelo y del agua. Colegio de Posgraduados-SARH-SSP. México, D. F.
- Arnés, E., J. Antonio, Ek del Val, and M. Astier. 2013. Sustainability and climate variability in low-input peasant maize systems in the central Mexican highlands. *Agric. Ecosyst. Environ.* 181: 195-205.
- Astier, C. M., M. Maass M. y J. Etchevers B. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36: 605-620.
- Astier, M., J. M. Maass, J. Etchevers-Barra, J. J. Peña, and F. de León-González. 2006. Short-term green manure and tillage management effects on maize yield and soil quality in an Andisol. *Soil Tillage Res.* 88: 153-159.
- Astier, M., Y. Merlín-Urbe, L. Villamil-Echeverri, A. Garciarreal, M. E. Gavito, and O. R. Masera. 2014. Energy balance and greenhouse gas emissions in organic and conventional avocado orchards in Mexico. *Ecol. Indic.* 43: 281-287.
- Bakker, M., G. Govers, and M. D. A. Rounsevell. 2004. The crop-productivity-erosion relationship: an analysis based on experimental work. *Catena* 57: 55-76.
- Batjes, N. H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 151-163.
- Bautista C., A., J. Etchevers B., R. F. del Castillo y C. Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13: 90-97.
- Bedard-Haughn, A., F. Jongbloed, J. Akkerman, A. Uijl, E. de Jong, T. Yates, and D. Pennock. 2006. The effects of erosional and management history on soil organic carbon stores in ephemeral wetlands of hummocky agricultural landscapes. *Geoderma* 296-306.
- Bermeo, A., S. Couturier, and M. Galeana Pizaña. 2014. Conservation of traditional smallholder cultivation systems in indigenous territories: Mapping land availability for milpa cultivation in the Huasteca Poblana, Mexico. *Appl. Geogr.* 53: 299-310.
- Bernoux, M., C. Feller, C. C. Cerri, V. Eschenbrenner, and P. E. C. Cerri. 2006. Soil carbon sequestration. pp. 15-26. *In:* E. J. Roose, R. Lal, C. Feller, B. Barthès, and B. A. Stewart (eds.). *Soil erosion and carbon dynamics*. Adv. Soil Sci. Taylor & Francis. Boca Raton, FL, USA.
- Beuchelt, T. D., C. T. Camacho V., L. Göhring, V. M. Hernández R., J. Hellin, K. Sonder, and O. Erenstein. 2015. Social and income trade-offs of conservation agriculture practices on crop residue use in Mexico's central highlands. *Agric. Syst.* 134: 61-75.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. 1990. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Cámarade Diputados, LXII Legislatura. 2014. Presupuesto de egresos de la Federación para el ejercicio 2014. Ramo 08: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Comisión Especial de seguimiento a las evaluaciones del programa especial concurrente, 23 pp. [https://www.google.com.mx/?gfe\\_rd=cr&ei=bmjWVdqFNIOO8QfBvpwCg&gws\\_rd=ssl#safe=active&q=pef+de+la+sagarpa](https://www.google.com.mx/?gfe_rd=cr&ei=bmjWVdqFNIOO8QfBvpwCg&gws_rd=ssl#safe=active&q=pef+de+la+sagarpa) (Consulta: agosto 20, 2015).
- Castellanos N., A., C. Rodríguez A., R. G. M de Goede, M. J. Kooistra, K. D. Sayre, L. Brussaard, and M. M. Pulleman. 2012. Earthworm activity and soil structural changes under conservation agriculture in central Mexico. *Soil Tillage Res.* 123: 61-70.
- Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. de Grau, R. Prieto G., A. C. Conde Á., A. Quintanar I., J. S. Santana S., R. Romero C., M. E. Maya M., J. G. Rosario de la C., Ma. del R. Ayala E., H. Carrillo T., O. Santiesteban y M. E. Bravo. 2013. Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. Informe Final del Proyecto al INECC, 150 pp. Con resultados disponibles en: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>. (Consulta: agosto 10, 2015).
- Cotler, H., E. Sotelo, J. Domínguez, M. Zorrilla, S. Cortina y L. Quiñones. 2007. La conservación de suelos: Un asunto de interés público. *Gaceta Ecol.* 83: 5-71.
- Cotler A., H. 2010. Evolución y perspectivas de la conservación de suelos en México. pp. 141-164. *In:* J. L. Lezama y B. Graizbord (eds.). *Los grandes problemas de México: Medio ambiente, volumen IV*. El Colegio de México. México, D. F.
- Cotler A., H., S. Cram, S. Martínez T. y V. Bunge. 2015. Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: Caso de las zanjas trincheras. *Investigaciones Geográficas: Boletín, Instituto de Geografía, UNAM*. dx.doi.org/10.14350/rig.47378.
- Covaleda, S., S. Pajares, F. J. Gallardo, and J. D. Etchevers. 2006. Short-term changes in C and N distribution in soil particle size fractions induced by agricultural practices in a cultivated volcanic soil from Mexico. *Org. Geochem.* 37: 1943-1948.
- Crovetto, C. 1996. Stubble over the soil. The vital role of the plant residue in soil management to improve soil quality. Special Publication 19. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- De León-González, F., M. M. Hernández S., J. Etchevers B., F. Payán Z., and V. Ordaz Ch. 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.
- Delgado, J. A., M. A. Nearing, and C. W. Rice. 2013. Chapter two. Conservation practices for climate change adaptation. *Adv. Agron.* 121: 47-115.
- Dendooven, L., Patiño Z., N. Verhulst, M. Luna G., R. Marsch, and B. Govaerts. 2012. Global warming potential of agricultural systems with contrasting tillage and residue management in the central highlands of Mexico. *Agric. Ecosyst. Environ.* 152: 50-58.
- Dendooven, L., V. F. Gutiérrez-Oliva, L. Patiño-Zúñiga, D. A. Ramírez-Villanueva, N. Verhulst, M. Luna-Guido, R. Marsch, J. Montes-Molina, F. A. Gutiérrez-Miceli, S. Vásquez-Murrieta, and B. Govaerts. 2012. Greenhouse gas emissions under conservation agriculture compared to traditional cultivation of maize in the central highlands of Mexico. *Sci. Total Environ.* 431: 237-244.
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura). 2008. Veinte años de experiencias en la producción de granos con tecnología de "labranza de conservación" 1998-2008. Boletín Informativo Nueva Época núm. 1. Talleres FIRA. Morelia, Michoacán, México.
- Flores D., L., S. L. Fedick, E. Solleiro R., S. Palacios M., P. Ortega L., S. Sedov, and E. Osuna C. 2011. A sustainable system of a

- traditional precision agriculture in a Maya home garden: Soil quality aspects. *Soil Tillage Res.* 113: 112-120.
- Follett, R. F., J. Z. Castellanos, and E. D. Buenger. 2005. Carbon dynamics and sequestration in an irrigated Vertisol in Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 83: 148-158.
- Fuentes, M., B. Govaerts, C. Hidalgo, J. Etchevers, I. González M., J. M. Hernández H., K. D. Sayre, and L. Dendooven. 2010. Organic carbon and stable  $^{13}\text{C}$  isotope in conservation agriculture and conventional systems. *Soil Biol. Biochem.* 42: 551-557.
- García F., N., J. Albaladejo, M. Almagro, and M. Martínez M. 2015. Beneficial effects of reduced tillage and green manure on soil aggregation and stabilization of organic carbon in a Mediterranean agroecosystem. *Soil Tillage Res.* 153: 66-75.
- García, S., R., D. Espinosa V., B. Figueroa S., N. E. García C. y J. F. Gallardo L. 2006. Reservas de carbono orgánico y de fracciones húmicas en un Vertisol sometido a siembra directa. *Terra Latinoamericana* 24: 241-251.
- Gobeille, A., J. B. Yavitt, P. Stalcup, and A. Valenzuela. 2006. Effects of soil management practices on soil fertility measurements on *Agave tequilana* plantations in Western Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 87: 80-88.
- González M., L., M. Acosta M., F. Carrillo A., A. Báez P. y J. M. González C. 2014. Cambios de carbono orgánico del suelo bajo escenarios de cambio de uso de suelo en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 7: 1275-1285.
- Govaerts, B., K. D. Sayre, and J. Deckers. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil Tillage Res.* 87: 163-174.
- Govaerts, B., K. D. Sayre, B. Goudeseune, P. de Corte, K. Lichter, L. Dendooven, and J. Deckers. 2009. Conservation agriculture as a sustainable option for the central Mexican highlands. *Soil Tillage Res.* 103: 222-230.
- Groisman, Y. P., R. W. Knight, D. R. Easterling, T. R. Karl, G. C. Hegel, and V. N. Razuvaev. 2004. Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Clim.* 18: 1326-1350.
- Harrington, L. 1996. Diversity by design: Conserving biological diversity through more productive and sustainable agroecosystems. CIMMYT Natural Resource Group. Presented at Biodiversity and Sustainable Agriculture, a workshop arranged by the Swedish Scientific Council on Biological Diversity. Ekenas, Sweden.
- Huerta, E. and H. van der Wal. 2012. Soil macroinvertebrates' abundance and diversity in home gardens in Tabasco, Mexico, vary with soil texture, organic matter and vegetation cover. *Eur. J. Soil Biol.* 50: 68-75.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2012. Encuesta Nacional Agropecuaria. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/tabuladosbasicos/tabdirecto.aspx?c=33621&s=est> (Consulta: julio 7, 2015).
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627.
- Lal, R. 2007. Constraints to adopting no-till farming in developing countries. *Soil Tillage Res.* 94: 1-3.
- Lal, R. 2014. Societal value of soil carbon. *J. Soil Water Conserv.* 69: 186-192.
- López, M. J. y G. M. Anaya. 1994. Efecto de tres prácticas agronómicas sobre la conservación y productividad de suelos de ladera de la frailesca, Chiapas. *Agric. Tec. Mex.* 20: 113-132.
- Martínez, M. M. 1999. Programas nacionales de conservación de suelos: análisis retrospectivo. pp. 407-426. In: C. Siebe, H. Rodarte, G. Toledo, J. Etchevers y K. Oleshko (eds.). *Conservación y restauración de suelos, programa universitario de Medio Ambiente-UNAM.* México, D. F.
- Matus, F. J. 1994. The distribution of soil organic matter of various aggregates size classes in arable soils. II. Residual organic  $^{14}\text{C}$ , residual  $^{14}\text{N}$ , microbial biomass  $^{14}\text{C}$  and  $^{14}\text{N}$  mineralization rates in a sand and a clay soil. pp. 99-114. In: F. J. Matus (ed.). *Crop residues decomposition, residual soil organic matter and nitrogen mineralization in arable soils with contrasting textures.* DLO Research Institute for Agro Biology and Soil Fertility. Wageningen, The Netherlands.
- McIntire, J. 1994. A review of the soil conservation sector in Mexico. pp. 107-128. In: E. Lutz, S. Pagiola, C. Reiche (eds.). *Economic and institutional analyses of soil conservation projects in Central America and the Caribbean.* World Bank Environment Paper 8. Washington, DC, USA.
- Mendoza V., J. and I. Messing. 2005. The influence of land use and fallow period on the properties of two calcareous soils in the humid tropics of southern Mexico. *Catena* 60: 279-292.
- Nahed, T. J., A. Valdivieso P., R. Aguilar J., J. Cámara C., and D. Grande C. 2013. Silvopastoral systems with traditional management in southeastern Mexico: a prototype of livestock agroforestry for cleaner production. *J. Cleaner Prod.* 57: 266-279.
- Oleschko, K., J. Etchevers, and A. R. Hernández C. 1996. Structure and pedofeatures of Guanajuato (Mexico) Vertisol under different cropping systems. *Soil Tillage Res.* 37: 15-36.
- Ortiz S., C. A. y H. Cuanalo de la Cerda. 1993. Evolución de la ciencia del suelo en México. *Ciencia* 23-32.
- Pimentel, D., C. Harvey, P. Resosudarmo, K. Sinclair, D. Kurz, M. McNair, S. Crist, L. Shpritz, L. Fitton, R. Saffouri, and R. P. Blair. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science* 267: 1117-1123.
- Pool Novelo, L., A. Trinidad-Santos, J. D. Etchevers B., J. Pérez M. y A. Martínez G. 2000. Mejoradores de la fertilidad del suelo en la agricultura de ladera de los altos de Chiapas, México. *Agrociencia* 34: 251-259.
- Presidencia de la República. 2014. Programa especial de cambio climático 2014-2018. Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. México, D. F.
- Pulido, J. S. and G. Bocco. The traditional farming system of a Mexican indigenous community: The case of Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, Mexico. *Geoderma* 111: 249-265.
- Ramírez B., C. E., B. Figueroa S., V. M. Ordaz C. y V. H. Volke H. 2006. Efecto del sistema de labranza cero en un vertisol. *Terra Latinoamericana* 24: 109-118.
- Reicosky, D. C. 2003. Tillage-induced  $\text{CO}_2$  emissions and carbon sequestration: Effect of secondary tillage and compaction. pp. 291-300. In: L. García-Torres, J. Benítez, A. Martínez-Villela, and A. Holgado-Cabrera (eds.). *Conservation agriculture.* Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands.
- Reyes R., B. G., R. Alcántara H., V. Rodríguez, V. Olalde P., and L. Dendooven. 2007. Microbial biomass in a semiarid soil of the central highlands of Mexico cultivated with maize or under natural vegetation. *Eur. J. Soil Biol.* 43: 180-188.
- Robert, M. 2001. Soil carbon sequestration for improved land management. *World Soil Resources Reports* 96, FAO, Roma. <http://www.fao.org/agl/agll/docs/wstr96e>. (Consulta: julio 7, 2015).

- Robertson, G. P., E. A. Paul, and R. R. Harwood. 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* 289: 1922-1925.
- Robles B., H. 2012. El caso de México, pp. 307-342. *In*: B. F. Soto y S. Gómez (eds.). *Dinámicas del mercado de la tierra en América Latina y el Caribe: Concentración y extranjerización*. FAO, Roma-Italia.
- Roldán, A., F. Caravaca, M. T. Hernández, C. García, C. Sánchez B., M. Velásquez, and M. Tiscareño. 2003. No-tillage, crop residue additions, and legume cover cropping effects on soil quality characteristics under maize in Patzcuaro watershed (Mexico). *Soil Tillage Res.* 72: 65-73.
- Roldán, A., J. R. Salinas G., M. M. Alguacil, and F. Caravaca. 2005. Changes in soil enzyme activity, fertility, aggregation and C sequestration mediated by conservation tillage practices and water regime in a maize field. *Appl. Soil Ecol.* 30: 11-20.
- Romero P., R., N. Verhulst, D. de La Rosa, V. Hernández, M. Maertens, J. Deckers, and B. Govaerts. 2014. Effects of tillage and crop residue management on maize yields and net returns in the Central Mexican highlands under drought conditions. *Pedosphere.* 24: 476-486.
- Rosas M., M. A., F. de León-González, A. Flores M., F. Payán Z., F. Borderas T., F. Gutiérrez R., and C. Fragoso G. 2010. Effect of tillage, sampling date and soil depth on earthworm population on maize monoculture with continuous stover restitutions. *Soil Tillage Res.* 108: 37-42.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2013. Reglas de operación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación para el ejercicio fiscal 2015. *Diario Oficial* 28 de diciembre 2014. [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5377526&fecha=28/12/2014](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5377526&fecha=28/12/2014) (Consulta: julio 7, 2015).
- Salinas G., J. R., A. D. Báez G., M. Tiscareño L., and E. Rosales 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.
- Sarukhán, J., J. Carabias, P. Koleff y T. Urquiza H. 2012. *Capital natural de México: Acciones estratégicas para su valoración, preservación y recuperación*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la biodiversidad. México, D. F.
- Scherr, S. J. and S. Yadav. 1996. Land degradation in the developing world: Implications for food, agriculture, and the environment to 2020. Discussion Paper 14. International Food Policy Research Institute. Washington, DC, USA.
- Schlesinger, W. H. and J. A. Andrews. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry* 48: 7-20.
- SEMARNAT-COLPOS (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Colegio de Posgraduados). 2002. Evaluación de la degradación de los suelos causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000. Memoria Nacional 2001-2002. México, D. F.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2013a. Estrategia Nacional de Cambio Climático, *Diario Oficial* 3/06/2013. [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5301093&fecha=03/06/2013](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5301093&fecha=03/06/2013). (Consulta: julio 10, 2015).
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2013b. Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial* 12 Diciembre 2013.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2014. Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030. Intended Nationally determined contribution (INDC). [http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/mexico\\_indc\\_espanolv2.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/mexico_indc_espanolv2.pdf) (Consulta: julio 10, 2015).
- SEMARNAT-INECC (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). 2012. Quinta comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. México, D. F.
- SIAP-SAGARPA (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2014. Atlas agroalimentario México 2014. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. México, D. F.
- Tiscareño, M., A. D. Báez G., M. Velásquez V., K. N. Potter, J. J. Stone, M. Tapia V., and R. Claverán. 1999. Agricultural research for watershed restoration in central México. *J. Soil Water Conserv.* 54: 686-692.
- Uri, D. N. 2000. Perceptions on the use of no-till farming in production agriculture in the United States: An analysis of survey results. *Agric. Ecosyst. Environ.* 77: 263-266.
- Vargas, E. y M. Vanegas. 2012. Evaluación complementaria del PROCOREF. Ejercicio Fiscal 2011. Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/579Restauraci%C3%B3n%20de%20ecosistemas%20forestales.pdf> (Consulta: julio 10, 2015).
- Vergara S., M. A., J. D. Etchevers B. y M. Vargas H. 2004. Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México. *Terra Latinoamericana* 22: 359-367.
- Yúnez, A. 2010. Las políticas públicas dirigidas al sector rural: El carácter de las reformas para el cambio estructural, pp. 24-59. *In*: A. Yúnez (coord.). *Economía rural. Los grandes problemas de México*, vol. XI, El Colegio de México. México, D. F.