

Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor

Nele Verhulst, Isabelle François,
Bram Govaerts



Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor

Nele Verhulst, Isabelle François, Bram Govaerts



Este material didáctico fue redactado por el Programa de Agricultura de Conservación del CIMMYT de México. Dirija sus comentarios para mejorarlo a Bram Govaerts (b.govaerts@cgiar.org).

El Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, CIMMYT® (www.cimmyt.org), es una organización de investigación y capacitación sin fines de lucro con socios en más de 100 países. El centro trabaja para incrementar de manera sustentable la productividad de los sistemas del maíz y del trigo sistemas y, por lo tanto, asegurar la seguridad alimentaria global y reducir la pobreza.

Los productos y servicios del centro incluyen variedades mejoradas de maíz y trigo, y sistemas de cultivo, la conservación de los recursos genéticos del maíz y del trigo, y el desarrollo de la capacidad. El CIMMYT pertenece y es financiado por el Grupo Consultivo sobre la Investigación Agrícola Internacional (*Consultative Group on International Agricultural Research, CGIAR*) (www.cgiar.org) y también recibe apoyos de gobiernos nacionales, fundaciones, bancos de desarrollo y otros organismos públicos y privados. El CIMMYT está particularmente agradecido por el generoso financiamiento sin restricciones que ha mantenido al centro fuerte y eficiente durante tantos años.

© Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) 2015. Todos los derechos reservados. Las denominaciones utilizadas en la presentación de los materiales en esta publicación no implican la opinión en absoluto o en parte del CIMMYT o sus organizaciones contribuyentes respecto a la situación legal de cualquier país, territorio, ciudad o área, o de sus autoridades o respecto a la delimitación de sus fronteras. El CIMMYT promueve el uso justo de este material. Se solicita que sea citado apropiadamente cuando corresponda.

Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor

Nele Verhulst ^a, Isabelle François ^b, Bram Govaerts ^a

^a Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y Trigo, Apdo. Postal 6-641, 06600 México, D.F., México

^b Consultor independiente

1. Introducción

1.1. Agricultura de conservación

Los esfuerzos humanos para producir cantidades cada vez mayores de alimentos dejan su marca en el ambiente. El uso persistente de prácticas agrícolas convencionales con base en la labranza extensiva, especialmente cuando se combinan con el retiro o quema de los residuos del cultivo, han magnificado las pérdidas por erosión del suelo y el recurso suelo se ha degradado constantemente. Otra consecuencia directa del uso persistente de prácticas de producción tradicionales por los agricultores es el rápido incremento de los costos de producción; los costos de los insumos tales como variedades mejoradas y fertilizantes continúan incrementándose y los agricultores hacen un uso ineficiente de estos. A pesar de la disponibilidad de variedades mejoradas con un mayor potencial de rendimiento, no se logra el incremento potencial en la producción debido a los malos sistemas de manejo de cultivos. En la actualidad, se ha empezado a entender que la agricultura no solo debe tener una alta productividad, sino también ser sustentable. Se ha propuesto a la agricultura de conservación como un conjunto de principios de manejo ampliamente adaptado que pueden asegurar una producción agrícola más sustentable. La agricultura de conservación es un concepto más amplio que la labranza de conservación, un sistema donde al menos 30 % de la superficie del suelo está cubierta con residuos del cultivo anterior, después de la siembra del próximo cultivo. En la agricultura de conservación, el énfasis no solo cae sobre el componente de la labranza sino sobre la combinación de los siguientes tres principios:

1. Reducción en labranza: El objetivo es lograr un sistema con cero labranza (es decir, sin labranza) pero el sistema puede involucrar sistemas de siembra con labranza controlada que, por lo general, no perturben más del 20-25 % de la superficie del suelo.
2. Retención de cantidades suficientes de residuos del cultivo y cobertura de la superficie del suelo: El objetivo es la retención de suficientes residuos sobre el suelo para:
 - proteger el suelo de la erosión hídrica y eólica;
 - reducir los escurrimientos de agua y la evaporación;
 - mejorar la productividad del agua; y

- mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo asociadas con una productividad sustentable a largo plazo.
3. Uso de rotación de cultivos: El objetivo es usar una rotación de cultivos diversificados para:
 - ayudar a moderar/mitigar posibles problemas de malezas, enfermedades y plagas;
 - utilizar los efectos benéficos de algunos cultivos sobre las condiciones del suelo y sobre la productividad del próximo cultivo; y
 - proporcionar a los agricultores opciones económicamente viables que minimicen los riesgos.

Estos principios de la agricultura de conservación son aplicables a una amplia variedad de sistemas de producción de cultivos desde condiciones con baja productividad, en temporal hasta condiciones con alta productividad en riego. Sin embargo, la aplicación de los principios de la agricultura de conservación será muy diferente de un sistema de producción a otro. Es necesario identificar los componentes del manejo tales como las tácticas de control de plagas y malezas, estrategias de manejo de nutrientes y rotación de cultivos, entre otros, por medio de investigación aplicada con la participación activa de los agricultores.

La agricultura de conservación ha sido promovida como una práctica agrícola que incrementa la sustentabilidad agrícola y está asociada con el potencial de reducir las emisiones de gases con efecto invernadero. Sin embargo, hay informes contrastantes sobre el potencial de prácticas de agricultura de conservación para la captura de carbono (es decir, el proceso de sustraer el dióxido de carbono, CO₂, de la atmósfera y depositarlo en el suelo).

2. Ciclo del carbono y del nitrógeno

2.1. El ciclo global del carbono y del nitrógeno

El ciclo global del carbono consiste de un ciclo bioquímico a corto plazo, y de un ciclo geoquímico a largo plazo. Anualmente, las actividades humanas alteran ambos ciclos al emitir 8.6 Pg de carbono (petagramo, 10¹⁵ gramos o 1 billón de kilogramos). De este carbono emitido, 3.3 Pg son

absorbidos por la atmósfera y 2.2 Pg son absorbidos por el océano (figura 1a). En los últimos 150 años, las emisiones de CO₂ a la atmósfera se han incrementado en 31 %. La reserva de carbono en el suelo comprende dos componentes:

- (1) La reserva de carbono orgánico en el suelo (COS).
- (2) La reserva de carbono inorgánico en el suelo (CIS).

Las actividades agrícolas afectan principalmente la reserva de COS. Adicionalmente, la degradación del carbono en el suelo lleva a importantes pérdidas en la calidad del suelo y representa una amenaza para los sistemas de producción agrícola y seguridad alimentaria. Al asegurar la sustracción neta del dióxido de carbono de la atmósfera hacia el suelo (captura del carbono en el suelo) se incrementa la sustentabilidad de los sistemas agrícolas.

El nitrógeno en la tierra consiste principalmente de una reserva de gas en la atmósfera y una reserva de intercambio entre la biota y el suelo en forma de nitrato (NO₃⁻), nitrito (NO₂⁻) y amonio (NH₄⁺) (figura 1b). La actividad humana ha duplicado la transferencia de nitrógeno de la atmósfera a las reservas biológicamente disponibles (principalmente por medio de la fijación del nitrógeno industrial) con un aumento en la emisión, transporte, reacción y deposición asociadas a gases de nitrógeno tales como el óxido nitroso (N₂O), el óxido nítrico (NO) y el amoníaco (NH₃).

Los ciclos globales de carbono y nitrógeno están conectados. La descomposición de la materia orgánica del suelo libera CO₂ a la atmósfera y amonio (NH₄⁺) al suelo, y cuando el amonio no es asimilado por microorganismos es oxidado bajo condiciones

aerobias a nitrato (NO₃⁻) (figura 1b). Este proceso, llamado *nitrificación*, consiste de dos pasos. El amonio, cuando no es asimilado por microorganismos, reacciona con el oxígeno para formar nitrito (NO₂⁻), lo cual es seguido por la oxidación de estos nitritos a nitratos (NO₃⁻).

Cuando el estado del oxígeno en el suelo cambia, se inhibe la nitrificación y el proceso de *desnitrificación* reduce el nitrato (NO₃⁻) a nitrito (NO₂⁻), óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N₂O) y nitrógeno molecular (N₂). En los suelos, la nitrificación y desnitrificación se pueden presentar al mismo tiempo e incluso existen microorganismos que pueden oxidar el NH₄⁺/NO₂⁻ y reducir el NO₂⁻/NO₃⁻ al mismo tiempo. El N₂O es un gas con efecto invernadero. La contribución al calentamiento global de los gases con efecto invernadero biológicos más importantes es 70 %, 23 % y 7 % para el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), respectivamente.

2.2. Ciclo del carbono y del nitrógeno en los sistemas agrícolas

2.2.1. Carbono

La asimilación del carbono en los cultivos se presenta por medio de la fotosíntesis y entra en el suelo como un residuo de biomasa aérea y biomasa de raíz. El material orgánico muerto es colonizado por diversos organismos del suelo, los cuales sacan energía para el crecimiento de la descomposición oxidativa de moléculas orgánicas complejas. Durante la descomposición, aproximadamente la mitad del carbono es mineralizado y liberado como CO₂. Hay cuatro fuentes de emisiones de CO₂ en los sistemas agrícolas:

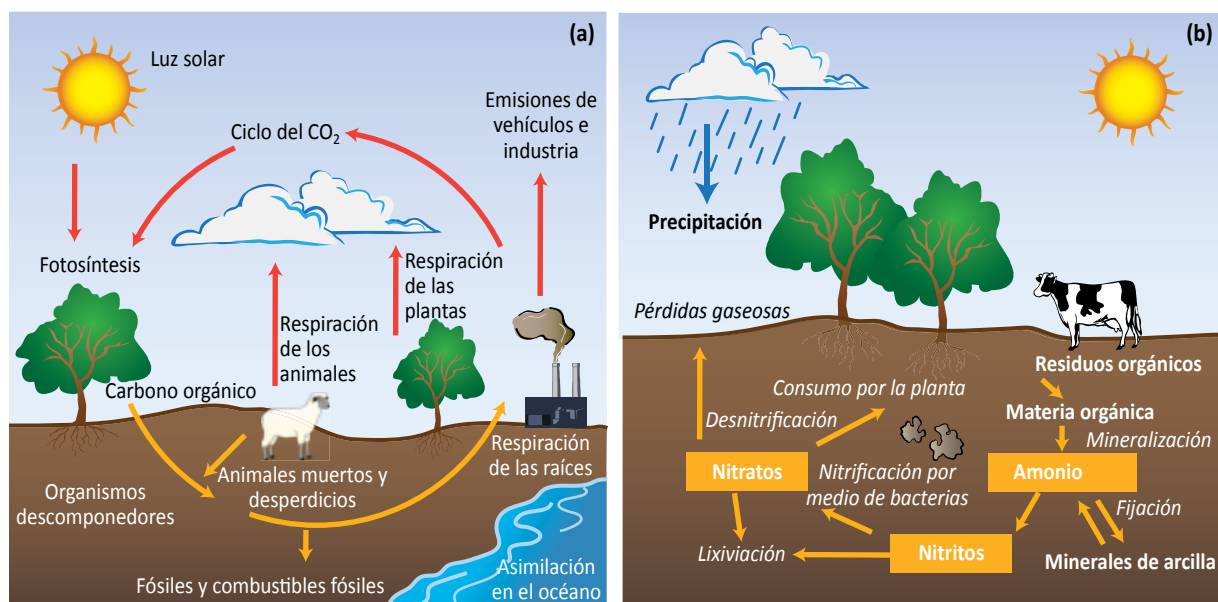


Figura 1. (a) El ciclo del carbono. Las actividades humanas y animales liberan CO₂, el cual es absorbido por el océano, la atmósfera y otros sumideros. La extracción de carbono para su uso como combustibles fósiles tales como el carbón, gas y petróleo, ha llevado a un incremento en la emisión de CO₂. (b) El ciclo del nitrógeno. La principal reserva de nitrógeno en el suelo está en forma de nitrato (NO₃⁻), nitrito (NO₂⁻) y amonio (NH₄⁺) (adaptado de www.windows2universe.org).

- Respiración de las plantas.
- Oxidación del carbono orgánico en los suelos y residuos del cultivo.
- Uso de combustibles fósiles para maquinaria agrícola tales como tractores y equipo de riego.
- Uso de combustibles fósiles en la producción de insumos agrícolas tales como fertilizantes y plaguicidas.

Los suelos también pueden ser productores de CH₄, por ejemplo, en los humedales o los cultivos de arroz.

Las concentraciones de carbono en el suelo están determinadas por el balance de los aportes, como los residuos del cultivo, y las pérdidas de carbono por medio de la descomposición de la materia orgánica. El manejo para acumular COS requiere el incremento en el aporte de carbono, la reducción de la descomposición, o ambos.

El aporte de carbono puede incrementarse al:

- Intensificar las rotaciones de cultivo.
- Reducir la labranza y retener los residuos del cultivo.
- Optimizar los insumos agronómicos tales como fertilizantes, riego, plaguicidas y enclado.

La descomposición del carbono puede reducirse al:

- Cambiar las prácticas de labranza.
- Incluir cultivos con residuos de descomposición lenta en la rotación.

Después de una mejora en las prácticas de manejo agrícola, el carbono orgánico en el suelo alcanzará gradualmente un nuevo estado en equilibrio. Los estimados del tiempo requerido para alcanzar el nuevo estado en equilibrio varían entre 20 a 40 años y 50 a 100 años.

2.2.2. Nitrógeno

Los ciclos del carbono y del nitrógeno están ligados por medio de los reservorios en el cultivo y la materia orgánica del suelo. El nitrógeno puede entrar en el suelo desde la atmósfera mediante deposición seca y húmeda del nitrógeno, fertilizantes/abonos y fijación del nitrógeno. El contenido de nitrógeno en el suelo puede disminuir por medio de procesos como la volatilización del amoníaco (NH₃) y la emisión de productos de la desnitrificación (N₂, N₂O, NO). Asimismo, el nitrógeno mineral en el suelo puede ser usado mediante la absorción del nitrógeno por el cultivo. Los residuos del cultivo agregarán nitrógeno orgánico a la reserva del suelo. Este nitrógeno orgánico proveniente de los residuos de la descomposición de plantas y animales es convertido a formas minerales inorgánicas, llevando primero a la formación de amonio (NH₄⁺), en un proceso llamado *mineralización*. Sucede lo contrario cuando el amonio es asimilado por los microorganismos y reprocesado a nitrógeno orgánico

(*inmovilización*). Estos dos procesos están cambiando continuamente las reservas de nitrógeno mineral en el suelo. En casos de exceso de agua, el nitrógeno mineral (particularmente el NO₃⁻) puede lixiviarse más allá del alcance de las raíces del cultivo (*lixiviación*, figura 1b).

La dinámica del nitrógeno en los sistemas agrícolas es afectada en gran medida por las mayores cantidades agregadas de fertilizantes nitrogenados. El suministro de nitrógeno a los suelos incrementa la productividad y la acumulación de biomasa en corto plazo. Por lo tanto, se ha considerado que un aumento en las concentraciones de aportes de nitrógeno sería una estrategia para favorecer la captura de carbono en el suelo. Sin embargo, la aplicación de nitrógeno como fertilizante implica costos de emisión de CO₂, debido a la producción, empaque, transporte y aplicación de los fertilizantes. Adicionalmente, los incrementos en la materia orgánica del suelo pueden acelerar la dinámica del nitrógeno y, por lo tanto, la emisión de N₂O, un gas con efecto invernadero. En resumen, el nitrógeno afecta el balance neto de los gases con efecto invernadero en cuatro formas:

1. El CO₂ es liberado a partir de la energía y los combustibles fósiles requeridos para la producción intensiva de fertilizantes nitrogenados.
2. El rendimiento del cultivo cambia en función de la tasa de aplicación de nitrógeno.
3. El aumento en el uso de fertilizantes nitrogenados puede causar una reducción en el pH del suelo. Esto plantea el uso de cal agrícola, cuya producción también es de alto consumo energético y productora de CO₂.
4. Las emisiones de N₂O varían con la práctica de labranza y en función de la tasa de aplicación del nitrógeno.

3. Manejo del carbono en el suelo: Agricultura convencional frente a agricultura de conservación

3.1. Descomposición microbiana del carbono e inmovilización

El incremento del carbono orgánico en el suelo de los sistemas de cultivo depende del aporte y características del material orgánico agregado al suelo y su descomposición por microorganismos. La materia orgánica es el principal sustrato de carbono para los microorganismos del suelo. Con la mineralización, algo del carbono en el material orgánico es usado para el crecimiento y mantenimiento, mientras que el resto se respira como CO₂ y regresa a la atmósfera. Los factores que regulan la descomposición son:

- (1) Clima.
- (2) Limitaciones químicas relacionadas con los recursos de la biota del suelo.
- (3) Propiedades físicas del suelo.
- (4) Regulación biológica por medio de interacciones entre macro y microorganismos.

Las investigaciones han mostrado que el material vegetal se descompone más rápidamente en suelos con un volumen relativamente grande de poros con diámetros del cuello de 15-60 μm . Conforme la descomposición continua, la calidad de los recursos cambia: los sustratos que asimilan con facilidad son metabolizados rápidamente mientras que los compuestos resistentes tales como la lignina tienden a acumularse. La deficiencia de nutrientes en cualquier etapa de la descomposición puede limitar la actividad microbiana y de esta manera bloquear la liberación de nutrientes. El nutriente que falta con mayor frecuencia es el nitrógeno.

3.1.1. La influencia de la macrofauna del suelo sobre la agregación

Se ha observado que la actividad de la macrofauna del suelo contribuye con la formación de macro y microagregados. En particular, las lombrices de tierra, hormigas y termitas ('ingenieros de los ecosistemas') ingieren una mezcla de materia orgánica y suelo mineral favoreciendo la incorporación de los residuos en el suelo y, por lo tanto,

contribuyen con los niveles de agregación. Los excrementos de las lombrices de tierra promueven la creación de complejos estables, de compuestos orgánicos y minerales, que se descomponen más lentamente y favorecen la estabilidad del suelo si se permite que se sequen o se añejen. La macrofauna del suelo también tiene un papel importante en la formación de microagregados. Durante el tránsito por el aparato digestivo, los materiales orgánicos son muy bien mezclados y se incrustan en la mucosidad para crear núcleos iniciando la formación del microagregado.

En los sistemas convencionales, hay un impacto directo (abrasión física por la labranza y ausencia de cobertura de residuos) y un impacto indirecto (destrucción del hábitat) sobre la macrofauna del suelo que lleva a la ausencia o presencia muy baja de poblaciones. Esto explica por qué las poblaciones de macrofauna del suelo son por lo general mayores con la agricultura de conservación en comparación con los sistemas convencionales. La mayor complejidad biológica en la agricultura de conservación implica que la macrofauna regule en parte la descomposición por biomasa microbiana y favorezca las formaciones de agregados biogénicos.

3.1.2. Macroagregados y microagregados dentro de los macroagregados

Los macroagregados gradualmente se van uniendo por medio de agentes de unión temporales (es decir, hifas y raíces) y transitorios. Estos agentes de unión temporales (es decir, polisacáridos microbianos y vegetales) se descomponen gradualmente en fragmentos (materia orgánica en partículas o MOP) los cuales, cuando están recubiertos con mucílago bacterianos o fúngicos, se

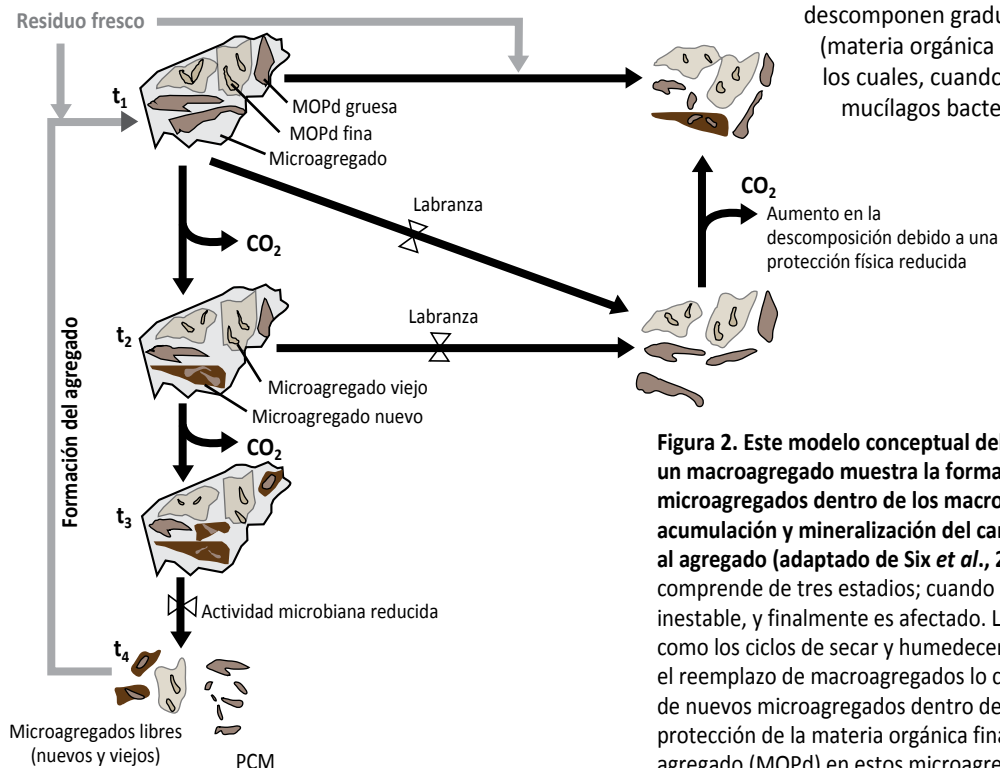


Figura 2. Este modelo conceptual del 'ciclo de vida' de un macroagregado muestra la formación de nuevos microagregados dentro de los macroagregados y la acumulación y mineralización del carbono orgánico asociado al agregado (adaptado de Six *et al.*, 2000). El ciclo del agregado comprende de tres estadios; cuando es formado, se vuelve inestable, y finalmente es afectado. Las perturbaciones tales como los ciclos de secar y humedecer, y/o la labranza aumentan el reemplazo de macroagregados lo cual previene la formación de nuevos microagregados dentro de los macroagregados y la protección de la materia orgánica fina en partículas dentro del agregado (MOPd) en estos microagregados.

encostran con arcillas. Este proceso da como resultado la creación de microagregados dentro de los macroagregados (figura 2). Es el carbono orgánico en partículas dentro del agregado (C MOPd) en los microagregados del suelo las que constituyen los principales mecanismos para la captura de carbono a largo plazo en los suelos agrícolas.

Los microagregados dentro de los macroagregados constituyen hábitats relativamente estables y aislados para los microorganismos. El reemplazo de macroagregados en condiciones con baja perturbación en la agricultura de conservación es suficientemente lento para permitir que el C MOPd fino se establezca predominantemente en materia libre y dentro de los microagregados. Los sistemas convencionales alteran este proceso.

La labranza perturba a los macroagregados exponiendo el C MOPd grueso al ataque de microorganismos y previene su incorporación en los microagregados como C MOPd fino. Las diferencias en el carbono orgánico del suelo que se han observado entre los sistemas de agricultura de conservación y convencionales se explican en su mayoría porque el C MOPd está más protegido en sistemas de cero labranza que en sistemas con perturbación de labranza (figura 3).

El reemplazo más lento de microagregados dentro de los macroagregados en los sistemas con cero labranza permite una mayor protección de la MOP gruesa y una mayor estabilización de los productos de la mineralización del carbono unidos a compuestos minerales en los microagregados dentro de los macroagregados.

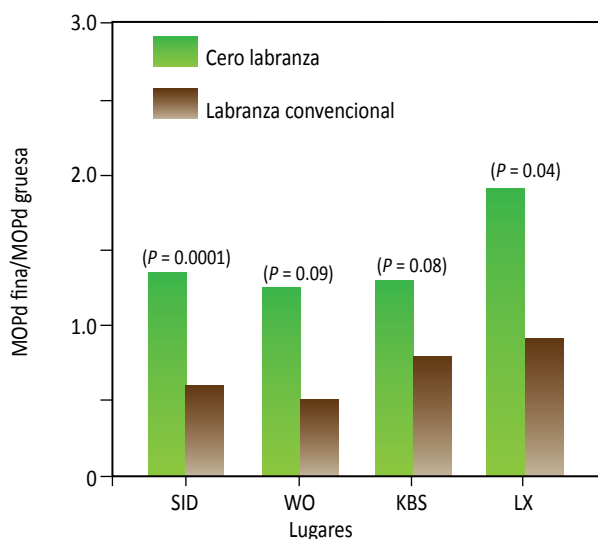


Figura 3. Diferencias en la proporción de materia orgánica fina y gruesa en partículas dentro de microagregados (MOPd fina/MOPd gruesa) entre la agricultura de conservación (cero labranza) y sistemas convencionales (adaptado de Six et al., 2004).

3.2. La importancia del análisis del ciclo del carbono completo

Se deben considerar la captura de carbono en el suelo, el almacenamiento del carbono en los residuos de los cultivos y las emisiones de CO₂ de las actividades agrícolas en su conjunto para evaluar la capacidad de mitigación de diferentes actividades agrícolas al CO₂ atmosférico. Para incluir actividades agrícolas, los estimados deberán contemplar el uso de energía y emisiones de CO₂ para los principales combustibles, electricidad, fertilizantes, cal, plaguicidas, irrigación, producción de semillas y maquinaria agrícola. La mayor contribución que la agricultura de conservación hace para reducir las emisiones de CO₂ asociadas con las actividades agrícolas es por medio de la reducción de las operaciones de labranza. Sin embargo, mientras que el aumento en la captura de carbono continuará durante un tiempo finito, la reducción en el flujo de CO₂ neto a la atmósfera, causado por la reducción en el uso de combustibles fósiles, puede continuar de forma indefinida, en tanto la práctica alterna continúe y pueda más que compensar la cantidad de carbono retenido en el suelo a largo plazo.

La agricultura de conservación también puede reducir las emisiones de CO₂ al ahorrar agua para riego. El riego contribuye con las emisiones de CO₂ debido a que se usa energía para bombear el agua de riego y, cuando se disuelve, el calcio (Ca) se precipita en el suelo, formando carbonato de calcio (CaCO₃) y liberando CO₂ a la atmósfera. El uso de residuos en los sistemas de cero labranza eleva el contenido de humedad en el suelo, ahorrando potencialmente agua de riego.

3.3. La influencia de la agricultura de conservación sobre las reservas de carbono orgánico en el suelo

Se pueden medir las reservas de carbono orgánico en el suelo directamente con muestras de suelo o se pueden inferir por medio de emisiones de CO₂ del suelo. Cuando se mide el COS en muestras de suelo, se deben considerar los siguientes factores:

- (1) Densidad aparente.
- (2) Profundidad del muestreo.

La *densidad aparente* puede verse afectada por la práctica de la labranza. Se han registrado valores más altos para la densidad aparente en sistemas de cero labranza. Por lo tanto, si se toman muestras a la misma profundidad para la agricultura de conservación y para la labranza convencional, se tomará una masa de suelo mayor en los suelos sin labranza. Esto podría incrementar la masa de COS en el suelo de cero labranza y pudiera exagerar la diferencia en el COS entre los dos sistemas. Se debe tomar una masa de suelo equivalente,

cuando no se toman muestras de toda la capa arable del suelo y hay cantidades importantes de COS situadas por debajo de la profundidad de muestreo.

La práctica de labranza también puede influir en la distribución del COS en el perfil con un mayor contenido de materia orgánica del suelo (MOS) en las capas superficiales con sistemas sin labranza que con labranza convencional, pero un mayor contenido de COS en las capas más profundas donde los residuos se incorporan por medio de la labranza. Por lo tanto, puede ser necesario ajustar la *profundidad del muestreo*. Para explicar las posibles diferencias en la distribución de las raíces y la rizodposición entre las prácticas de manejo, se deben tomar muestras de todo el perfil del suelo.

Los cambios en el carbono del suelo pueden, en principio, ser inferidos a partir de las mediciones continuas del intercambio neto de CO₂ en el ecosistema entre la superficie del suelo y la atmósfera, considerando que otras adiciones o pérdidas de carbono (por ejemplo, grano cosechado) casi no se toman en cuenta. Las mediciones de las emisiones de CO₂ se han limitado principalmente al periodo después de la labranza. Sin embargo, a nivel estacional, los flujos de CO₂ también son levemente mayores para la labranza convencional en comparación con la agricultura de conservación.

Para entender de mejor manera la influencia de los diferentes componentes que comprenden la agricultura de conservación (labranza reducida, retención de residuos del cultivo y rotación de cultivos) sobre las reservas de COS, revisaremos los efectos de cada uno de estos componentes.

3.3.1 La influencia de la práctica de la labranza sobre las reservas de carbono orgánico en el suelo

Todavía no se conoce la influencia de la labranza reducida sobre las reservas de COS. Los resultados son con frecuencia contradictorios. En muchos estudios, las concentraciones de COS con sistemas de cero labranza fueron significativamente diferentes de las concentraciones de COS en sistemas con labranza convencional y labranza reducida, mientras que las concentraciones de COS en los sistemas con labranza convencional y labranza reducida no presentaron una diferencia significativa. Los mecanismos que rigen el balance entre un aumento o no de la captura después de la conversión a sistemas de cero labranza no son claros. Si bien se requieren más investigaciones, se pueden distinguir algunos factores importantes:

(1) Diferencias en el desarrollo de raíces y rizodépósitos:

El carbono derivado de las raíces del cultivo puede ser muy importante para el almacenamiento del carbono en el suelo. Los sistemas de cero labranza pueden generar una mayor distribución horizontal de las raíces y una mayor densidad de las raíces cerca de la superficie.

(2) Contenido inicial de carbono:

La efectividad del almacenamiento de carbono en los sistemas de cero labranza es reducida y puede ser negativa cuando se incrementa el contenido inicial de COS. Se puede especular que los suelos viejos agotados tienen un mayor potencial de retener carbono en comparación con suelos jóvenes con un alto contenido de carbono. Los suelos que han perdido COS por la erosión tienen un alto potencial de ganar COS cuando son convertidos de labranza convencional a cero labranza.

(3) Densidad aparente y porosidad del suelo:

Las propiedades físicas parecen determinar si el uso o no de prácticas de cero labranza mejorará el almacenamiento de carbono al incrementar la protección física del COS. Los poros con un diámetro de cuello entre 15 y 60 μm parecen generar una descomposición rápida del carbono dentro.

(4) Clima:

Los impactos del manejo son sensibles al clima en el siguiente orden en cambios mayores a menores en el COS: trópico húmedo > trópico seco > templado húmedo > templado seco. Por lo tanto, los efectos de labranza sobre el carbono del suelo tienden a ser menores o negativos en suelos fríos templados. Las condiciones climáticas que influyen los procesos vegetales y del suelo que dirigen la dinámica de la materia orgánica influyen los impactos del manejo agrícola sobre el almacenamiento del COS. Los procesos involucrados son:

1. La degradación del MOS después del cultivo.
2. La formación de agregados en suelos después de un cambio en la práctica de la labranza.
3. El incremento en la productividad y aporte de carbono con la implementación de una nueva práctica de cultivo.

(5) Topografía y antecedentes de erosión y deposición:

La mayoría de los estudios disponibles sobre la captura de carbono en diferentes sistemas se han realizado en pequeñas parcelas de investigación. En general, estas están situadas en porciones pequeñas niveladas de campos agrícolas para minimizar el error experimental. Sin embargo, esto no permite el estudio de la interacción de otros factores sobre los cambios en el COS. La topografía y los antecedentes de erosión y deposición tienen un papel importante. Las posiciones de paisaje que tuvieron una baja reserva de COS debido a la pasada erosión generalmente muestran ganancias en el COS. Las posiciones con grandes reservas de COS debido a la deposición muestran pérdidas después de 15 años de cero labranza.

(6) Condiciones subóptimas en campos de productores:

La investigación se lleva a cabo generalmente en parcelas que son manejadas en condiciones ideales. Esto no siempre es el caso en los campos de los agricultores. La producción agrícola y las decisiones de los agricultores se ven afectadas por diversas limitaciones y el manejo de recursos naturales es enfrentado en el sistema agrícola, en muchos casos llevando un manejo por debajo de las condiciones óptimas de la parcela, particularmente cuando los recursos para la producción son escasos. Estas condiciones pueden llevar a un retraso de 2-5 años en el periodo de acumulación de COS.

3.3.2. La influencia de la rotación de cultivos sobre las reservas de carbono orgánico en el suelo

Un incremento en la conservación de la humedad relacionada con prácticas de agricultura de conservación puede generar la opción de incluir un cultivo de cobertura adicional justo después de la cosecha del cultivo principal. Los cultivos de cobertura aumentan la protección del suelo, la fertilidad del suelo, la calidad del agua subterránea, manejo de plagas, concentración de COS, estructura del suelo y agregados estables en agua. Los cultivos de cobertura promueven la captura del COS al incrementar el aporte de residuos vegetales y proporcionar una cobertura vegetal durante periodos críticos. Sin embargo, la inclusión de cultivos de abono verde que fijan N₂ solo es factible en regiones sin una temporada seca prolongada (figura 4).

La agricultura de conservación incrementa la posibilidad de la intensificación del sistema de producción debido a un tiempo de espera más corto entre la cosecha y la siembra. Los cultivos se pueden sembrar más temprano y en una fecha de siembra más óptima. Además, se pueden introducir nuevos cultivos



Figura 4. Un campo de alfalfa, un típico cultivo de abono verde fijador de N₂.

ya que se puede incrementar el periodo de crecimiento real o se puede sembrar otro cultivo justo después de cosechar el cultivo principal. El aumento en el aporte de carbono como resultado de la mayor productividad debida a la intensificación del cultivo puede generar un aumento en la captura de carbono. El efecto de la rotación de cultivos sobre la captura de carbono se puede deber a un incremento en el aporte de carbono, debido a la producción intensificada, o debido al cambio en la calidad del aporte del residuo. La rotación de cultivos es más efectiva que los sistemas de monocultivo en retener el carbono y el nitrógeno en el suelo.

3.3.3. La influencia de la retención de residuos sobre las reservas de carbono orgánico en el suelo

Los residuos del cultivo son precursores de la reserva de MOS. La descomposición del material vegetal a compuestos de carbono sencillos, la asimilación y ciclo repetido del carbono a través de la biomasa microbiana con formación de nuevas células son las primeras etapas en el proceso de formación de humus. El regreso de más residuos del cultivo está asociado con un incremento en la concentración de COS.

La tasa de descomposición depende no solo de la cantidad de residuos retenidos, sino también de las características del suelo y la composición de los residuos (es decir, contenido de la fracción soluble, lignina, hemicelulosa y polifenol).

3.3.4. Agricultura de conservación: El efecto combinado de la labranza mínima, retención de residuos y rotación de cultivos sobre las reservas de carbono orgánico en el suelo

La agricultura de conservación no es una tecnología de un solo componente, sino el producto del efecto acumulativo de los tres componentes que lo forman. Sin embargo, aplicar

estos tres componentes no siempre es fácil. En áreas más áridas, la competencia por residuos es extremadamente alta y los agricultores luchan para mantener suficientes residuos sobre el suelo. La reducción de la labranza sin una suficiente retención de residuos puede generar una tremenda degradación del suelo.

La intensificación del sistema de producción dará como resultado un efecto añadido sobre el almacenamiento de carbono en los sistemas de cero labranza. Pero, para obtener una acumulación de MOS no solo debe haber un aporte de carbono de los residuos del cultivo sino un aporte externo

neto de nitrógeno, por ejemplo, incluir un cultivo de abono verde fijador de nitrógeno en la rotación de cultivos. La labranza convencional puede disminuir el efecto de un cultivo de abono verde fijador de nitrógeno ya sea debido a que el aporte de nitrógeno puede ser reducido por la liberación de nitrógeno mineral del suelo o que el nitrógeno se pueda perder por lixiviación (NO_3^-) o en formas gaseosas (vía NH_3 , volatilización o desnitrificación) debido a la mineralización de la MOS estimulada por el arado de discos. Por lo tanto, la intensificación de sistemas de producción, mediante la eliminación del barbecho y la conversión a cultivo continuo es el primer paso hacia el aumento en la captura de carbono. La reducción de la intensidad de la labranza, por medio de la adopción de sistemas sin labranza, aumenta el efecto de la intensificación del sistema de producción.

4. Agricultura de conservación en relación con otros gases con efecto invernadero

En estudios de gases con efecto invernadero en la agricultura de conservación, el CO_2 es el gas más estudiado. Sin embargo, debemos considerar el resultado neto de los flujos para los tres principales gases biogénicos con efecto invernadero (CO_2 , N_2O y CH_4), el cual es esencial para comprender el impacto de la agricultura sobre el potencial de calentamiento global. Los incrementos en la MOS pueden incrementar el ciclo del nitrógeno en el suelo, lo cual lleva a mayores emisiones de N_2O , ya que se estimula la nitrificación. Como resultado de esto, se formará más NO_3^- en el suelo, pero cuando se formen micrositios anaerobios, disminuirá la reducción de N_2O , lo cual incrementará la proporción de $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$. Sin embargo, los sistemas de cero labranza con retención de residuos mejora la estructura del suelo en comparación con la labranza convencional, por lo que se formarán menos micrositios anaerobios. Se necesitan más estudios para determinar cómo las emisiones de N_2O y NO son realmente afectadas.

Una mejor aireación del suelo generada por el aumento en el contenido de la materia orgánica y el resultante aumento en la estabilidad de la agregación inhibirá la desnitrificación y estimulará la oxidación del CH_4 . La conversión de suelos naturales a suelos agrícolas reduce su capacidad para servir como un sumidero para CH_4 . Sin embargo, la función del suelo como un sumidero para CH_4 es mucho menos importante que la función como una fuente de N_2O .

5. Agricultores manejan el carbono del suelo

5.1. El potencial económico de la agricultura de conservación para la captura de carbono

En las secciones anteriores se estableció el potencial técnico de la agricultura de conservación para la captura de carbono. En la siguiente sección, trataremos el potencial económico de la agricultura de conservación para la captura de carbono considerando la rentabilidad y el costo de la captura de carbono, así como los prospectos para la adopción extendida. Generalmente, los beneficios públicos fuera del sitio de la agricultura de conservación exceden los beneficios privados dentro del sitio. Se debe notar que la rentabilidad de la agricultura de conservación varía mucho, dependiendo de las características de los sistemas agrícolas, mercados e instituciones locales, y las políticas agroambientales pertinentes. El costo de la producción y uso de mano de obra se pueden incrementar en la agricultura de conservación, al menos inicialmente, pero los márgenes brutos y rendimientos en mano de obra son mayores que con la labranza convencional. Por ejemplo, la reducción en los costos de operación en el campo y los mayores rendimientos significan que las prácticas de agricultura de conservación tienen una rentabilidad relativamente mayor en comparación con la labranza convencional, en diversos sistemas agrícolas, climas y regiones.

Hay relativamente pocos estudios sobre el costo de la captura de carbono. Sin embargo, parece que la captura de carbono por medio del manejo de un sistema de cultivo mejorado es competitivo con la captura de carbono en otros sectores (con precios del carbono de USD \$10-25 por tonelada).

Los mercados del carbono ofrecen el potencial de un ingreso adicional para los agricultores que incluye, bajo ciertas condiciones, pequeños productores en países en desarrollo. El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kioto proporciona tanto el marco como el estímulo para el comercio del carbono (figura 5). El MDL permite a los países industrializados invertir en reducciones de las emisiones en donde sea más barato globalmente. Aunque el precio es bajo, esto ofrece otra fuente potencial de ingreso para los agricultores y podrá proporcionar un incentivo añadido para la adopción de la tecnología de captura de carbono. Al reducir sus emisiones de CO_2 , los agricultores no solo trabajarán de manera más sustentable, sino que recibirán un ingreso adicional a cambio.

5.2. Agricultores manejan el carbono del suelo: más allá de los incentivos directos

El manejo de la mayor parte del carbono del suelo cae en las manos de los agricultores, pastores y administradores forestales cuyas decisiones son determinadas por diversas

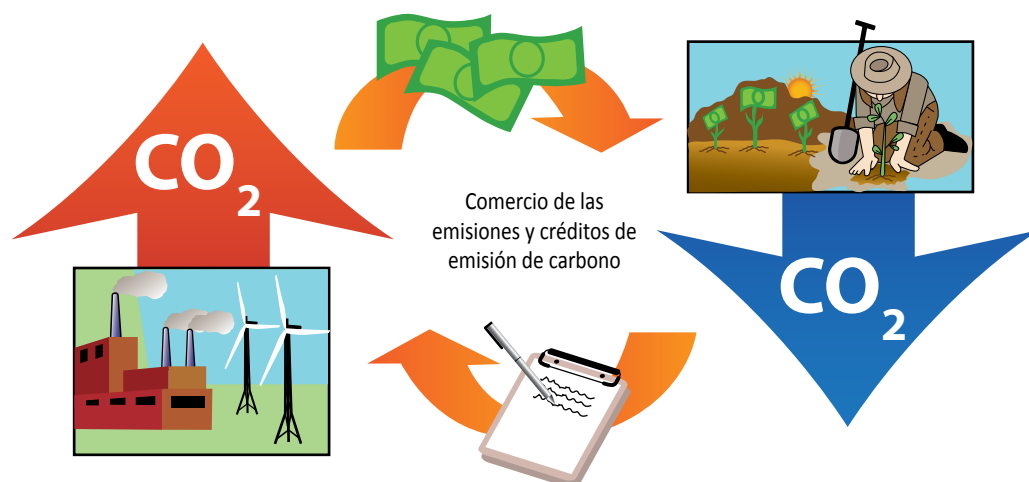


Figura 5. Visualización del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Los países industrializados pueden invertir en reducciones de las emisiones donde sea más barato globalmente. Esto proporciona a los agricultores con la oportunidad de obtener un ingreso adicional.

metas. El principal potencial para la agricultura de conservación como una estrategia de mitigación del clima se basa en las ganancias de la productividad agronómica y económica relacionadas. Como se describió anteriormente, los beneficios privados adicionales derivados de la adopción de la agricultura de conservación son por lo general sustanciales, incluso sin mercado o pagos de subsidio por la captura de carbono. La agricultura de conservación tiene la combinación en la que todos ganan de la tecnología de conservación de suelo y agua que también incrementa la productividad en la mayoría de los casos. Por ejemplo, mayores rendimientos dan como resultado una mejor calidad del suelo, especialmente en la capa superficial del suelo. El aumento en la agregación y la materia orgánica del suelo en la superficie llevan a un incremento en el uso eficiente del agua y los nutrientes, así como una reducción en la erosión del suelo. El incremento en la rentabilidad de la producción puede ser el principal factor determinante para que los agricultores pongan en práctica la agricultura de conservación y la estrategia de captura de carbono en el suelo y, por lo tanto, ir más allá de incentivos directos ineficaces y caros.

5.3 Limitaciones y vías para la adopción

La agricultura de conservación parece generar beneficios privados y sociales atractivos, así como mejorar la estabilidad del rendimiento y la productividad de los insumos. Debido a que queda claro que hay muchos beneficios ligados a la adopción de la agricultura de conservación, podemos preguntarnos por qué las tasas de adopción no son más rápidas. Hay unas cuantas razones que merecen ser tratadas:

(1) Las demandas competitivas sobre los recursos en campos de productores, tales como los residuos del cultivo, pueden representar importantes limitantes para la puesta en práctica de la agricultura de conservación,

especialmente en áreas agrícolas semiáridas de temporal donde hay una alta demanda de uso de residuos del cultivo para otros propósitos diferentes a dejarlos sobre el campo (por ejemplo, para forraje).

- (2) Los pequeños productores son muy diversos, con una variedad de características. Esto retrasa la adopción de nuevas tecnologías que aumentan la productividad.
- (3) Muchos pequeños productores tienden a evadir el riesgo de introducir nuevas prácticas porque se percibe como un riesgo para su seguridad alimentaria doméstica.
- (4) Los pequeños productores tienen poco acceso a capital financiero para maquinaria nueva o la compra de insumos tales como herbicidas.
- (5) Cuando los agricultores dependen de la mano de obra familiar o compartida, por lo general los trabajadores no tienen el entendimiento de la agricultura de conservación incluso si el agricultor tiene una buena apreciación de sus principios y prácticas.
- (6) Algunas veces, los propios agricultores no tienen educación y, por lo tanto, son excluidos de algunas de las corrientes de conocimiento que proporcionan información sobre la agricultura de conservación.
- (7) La pequeña escala por sí misma puede ser una limitante para el uso eficiente de muchos equipos agrícolas en la agricultura de conservación.

No es probable que en las tecnologías complejas con componentes múltiples tales como la agricultura de conservación se pueda ampliar la escala exitosamente por medio de modelos lineales tradicionales de investigación y extensión. En su lugar, estas requieren la creación de sistemas

innovadores para adaptar las tecnologías a las condiciones locales. Con este propósito, se están estableciendo hubs o nodos de innovación descentralizados dentro de diferentes sistemas agrícolas y zonas agroecológicas. En estos hubs, se organiza el contacto intenso y el intercambio de información entre diferentes socios en el proceso de investigación y extensión. Por medio de la investigación y capacitación, se establecen redes regionales de agricultura de conservación para facilitar y estimular la investigación y la extensión de sistemas y tecnologías innovadoras. Los hubs están vinculados directamente con las plataformas científicas estratégicas operadas por centros internacionales e institutos de investigación nacionales para permitir la síntesis y conocimiento global de la agricultura de conservación y su adaptabilidad a diferentes ambientes, sistemas de cultivo y circunstancias de los agricultores.

5.4. Las consecuencias de rotar las prácticas de labranza para la captura de carbono

Debido a que el COS responde de manera dinámica al manejo, una política para promover la captura de carbono presupone el mantenimiento de las prácticas, lo cual promueve la acumulación de materia orgánica. Una vez que se ha realizado la conversión a un sistema de cero labranza, lo mejor es no regresar a la labranza convencional. Sin embargo, se rotan los sistemas de labranza por diversas razones, incluida la optimización de rendimientos y el manejo de problemas de plagas y enfermedades. No se ha probado en el campo, pero los modelos de simulación muestran que cambiar el manejo de cero labranza a labranza convencional dentro de sistemas de monocultivo reduce el contenido de carbono en el suelo. La labranza genera pérdida del carbono del suelo, con un aumento en la emisión de CO₂ después de la labranza. A largo plazo, el efecto de una sola operación de labranza sobre el contenido de COS en campos que habían estado con cero labranza durante un periodo largo parece diferir entre los suelos con diferentes propiedades.

6. Conclusiones y perspectivas futuras

Actualmente, el área de suelo cultivada en el mundo ha sido muy degradada. Los cultivos requieren insumos en cantidades siempre mayores para mantener los rendimientos. La agricultura de conservación es un sistema de producción caracterizado por la maximización a corto plazo de la producción del cultivo así como por la potencial sustentabilidad a largo plazo. Todavía se deben abordar brechas importantes si se va a usar la agricultura de conservación como una estrategia para la captura de

carbono. Para el mundo en desarrollo y la mayoría de las áreas tropicales y subtropicales, falta información acerca de la influencia de la labranza y la rotación de cultivos sobre el almacenamiento del carbono. La mayoría de los estudios se han realizado a nivel de parcela, y se requiere más investigación holística a nivel de explotación agrícola, incluidas las limitantes del agroecosistema, así como los presupuestos totales de la captura de carbono en el ámbito regional y global.

Aunque la captura de carbono es cuestionable en algunas áreas y en algunos sistemas de cultivo, la agricultura de conservación sigue siendo una importante tecnología que mejora los procesos del suelo, controla la erosión del suelo y reduce los costos de producción relacionados con la labranza. La seguridad alimentaria mundial, la preservación ambiental, así como un incremento en los medios de vida de los agricultores, deberían ser las principales metas de un sistema agrícola sustentable.

Lecturas adicionales:

Govaerts, B., Verhulst, N., Castellanos-Navarrete, A., Sayre, K. D., Dixon, J., Dendooven, L., 2009 Conservation agriculture and soil carbon sequestration: Between myth and farmer reality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28:3, 97–122.

7. Agradecimiento

Esta publicación es un material de divulgación del CIMMYT que se realiza en el marco de la Estrategia de Intensificación Sustentable de los Sistemas de Producción de Granos en Latinoamérica. La estrategia recibe el apoyo del gobierno mexicano a través de la Sagarpa, de los programas de investigación del CGIAR MAIZE, WHEAT y CCAFS, USAID, Syngenta, Kellogg's y la Agencia Alemana de Cooperación Internacional (GIZ).

8. Referencias

- National Earth Sciences Teachers Association, 2012. Windows to the universe. Available at: www.windows2universe.org accessed 6 August 2012.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.* 32, 2099–2103.
- Six, J., Ogle, S.M., Breidt, F.J., Conant, R.T., Mosier, A.R., Paustian, K., 2004. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term. *Glob. Change Biol.* 10, 155–160.

