

Cuantificación agronómica del aumento de materia orgánica del suelo en siembra directa.

Por D. C. REICOSKY y D.W. ARCHER

Servicio de Investigación sobre Agricultura- USDA, Laboratorio de Investigación sobre la Conservación del Suelo de la Zona Norte Central, 803 Iowa Ave. Morris, MN 56267 EE.UU. E-mail: reicosky@morris.ars.usda.gov

Resumen

El secuestro de carbono (C) agrícola puede ser una de las maneras más rentables de reducir los procesos del calentamiento global. Se pueden obtener muchos beneficios ambientales de las actividades agrícolas que secuestran C del suelo y contribuyen con la seguridad ambiental. Las prácticas de siembra directa que secuestran C del suelo ayudan a reducir la erosión del suelo y a mejorar la calidad del agua, y también implican una agricultura más sustentable y menos químico-dependiente. Esta reseña discutirá dichos aumentos de materia orgánica en sistemas de siembra directa. A medida que tenemos un mayor conocimiento sobre el almacenaje de C del suelo y su rol fundamental en los beneficios ambientales directos, más debemos comprender la función de la labranza intensiva en los beneficios ambientales secundarios y lo que éstos significan para la agricultura de producción. El incremento del almacenaje de C en el suelo puede aumentar la infiltración, el ciclado de nutrientes y la fertilidad, disminuir la erosión del viento y del agua, minimizar la compactación, incrementar la calidad del agua, disminuir las emisiones de C, impedir la circulación de pesticidas y mejorar la calidad ambiental. La suma de todos estos beneficios tiene una gran importancia a nivel mundial. La ratificación y la promulgación del Protocolo de Kyoto brindarán incentivos económicos para una aceptación más rápida de las prácticas de agricultura de conservación. Incorporar el almacenaje de C a la planificación de conservación y, a la vez, conocer sobre la labranza menos intensiva y el manejo de rastrojos presenta algunos desafíos pero, a la vez, demuestra preocupación por nuestros recursos mundiales y presenta un rol positivo para el C del suelo que tendrá un impacto fundamental en nuestra calidad de vida futura.

Palabras Claves: materia orgánica del suelo, calidad del suelo, calidad del agua, calidad ambiental, no labranza, labranza cero, siembra directa, secuestro de carbono.

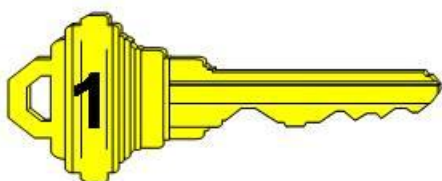
I. Introducción

La calidad del suelo es una base fundamental de la calidad ambiental. La calidad del suelo está ampliamente gobernada por el contenido de materia orgánica del suelo (MOS), que es dinámica y responde eficientemente a los cambios en el manejo del suelo, principalmente labranza y entrada de C. Mantener la calidad del suelo puede reducir los problemas de degradación de la tierra, que disminuyen la fertilidad del suelo y rápidamente reducen los niveles de producción. Dichos problemas tienen lugar en partes del mundo donde necesitan principios básicos de buenas prácticas agrícolas. Esta reseña discutirá principalmente los efectos de la no labranza (NL), labranza cero (LC) y siembra directa (SD) en el C del suelo y los beneficios ambientales de los sistemas de producción de conservación.

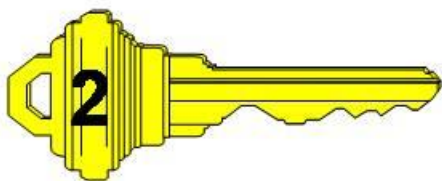
La terminología que se utiliza para dichos sistemas es "Agricultura de Conservación" (AC). La agricultura de conservación implica el cumplimiento de las tres "claves" que respaldan a la AC, Figura 1. Estos tres principios consisten en: el mínimo disturbio del suelo causado por la labranza, rotación de diferentes cultivos y/o cultivos de cobertura, y la cobertura permanente de residuos. El pilar que subyace tras los tres principios es el modo en que interactúan y contribuyen con el C del suelo, la determinante principal de la calidad del suelo. La agricultura de conservación incluye conceptos de NL, LC y SD como la forma principal de la AC. Por lo general, estos términos se utilizan indistintamente para denotar disturbio mínimo del suelo. Los métodos de

labranza reducida, a veces referidos como labranza de conservación como por ej. labranza en franja, labranza en surcos y labranza con cubierta vegetal que sólo perturban un pequeño volumen de suelo y mezclan parcialmente el residuo con el suelo, son intermedios respecto a los efectos de calidad del suelo. Estos términos necesitan una definición explícita del equipo de labranza y de las características operativas ya que están relacionadas con el volumen de suelo perturbado y el grado en que se mezcla de residuo con el suelo. Las formas extremas de labranza intensiva de inversión que incluyen el arado de vertedera, rastra de disco y determinados tipos de herramientas motorizadas de labranza rotativa no pueden considerarse una forma de conservación. Esta reseña discutirá principalmente los efectos de la NL, LC y SD en el C del suelo y los beneficios ambientales asociados dentro de los sistemas de producción de conservación con especial énfasis en las tres "claves" de la AC. Robert (2001), Uri (1999), Tebrugge & Guring (1999), y Lal y col. (1998) y Lal (2000) presentaron otras reseñas sobre el rol del secuestro de C en la AC. La agricultura tiene la oportunidad de compensar parte de las emisiones de CO₂ y tendrá un rol pequeño pero fundamental en el secuestro de C.

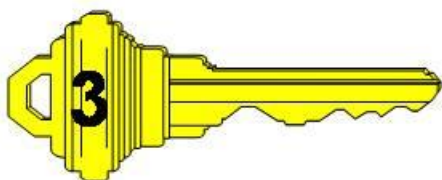
3 Claves para la Agricultura de Conservación



Disturbio mínimo del suelo



Cubierta de residuos permanente



Rotaciones diversas y/o cultivos cobertura

Figura 1. Representación esquemática de las tres "claves" de la AC.

Secuestro de carbono al utilizar no labranza

Cada vez más se considera a la agricultura de conservación como una alternativa para el uso de los sistemas de labranza de conservación y como una forma de secuestrar COS (Garcia-Torres y col. 2001; Follett, 2001, Reicosky, 2001a). La agricultura de conservación se puede utilizarse en muchas situaciones y es económica desde el punto de vista de mano de obra. Lo que resulta más importante es que las prácticas que secuestran COS contribuyen con la calidad ambiental y con el desarrollo de un sistema agrícola sustentable. La labranza u otras

prácticas que causan la destrucción o pérdida de la MOS y provocan una disminución neta del COS no son parte de una agricultura sustentable. Los sistemas agrícolas sustentables abarcan aquellas prácticas culturales que aumentan la productividad y, a su vez, aumentan el secuestro de C. El manejo de rastrojos, la labranza de conservación, el manejo eficiente de nutrientes, la agricultura de precisión, el manejo eficiente de agua, y la restauración de los suelos degradados contribuyen con una agricultura sustentable.

Las prácticas de labranza del suelo son de particular importancia para el estado del COS ya que afectan la dinámica del COS de forma directa e indirecta. Las prácticas de labranza que invierten o perturban el suelo superficial reducen considerablemente el COS ya que aumentan la descomposición y la mineralización de la biomasa debido a una mayor aireación y mezclado de los residuos vegetales del suelo, exponiendo así al COS previamente protegido en los agregados del suelo a la fauna del suelo, aumentando así las pérdidas por erosión (Lal, 1984; Dick y col., 1986a, b; Lal 1989; Blevens y Frye, 1993; y Tisdall, 1996). Por el contrario, la NL o los sistemas de labranza reducida que se practican por mucho tiempo aumentan el contenido de COS en la capa superficial del suelo como resultado de diferentes factores que interactúan, como un mayor retorno de rastrojos, menos mezcla y disturbio del suelo, mayor contenido de humedad del suelo, menor temperatura en la superficie del suelo, proliferación del crecimiento radicular y de la actividad biológica, y menor riesgos de erosión del suelo (Lal, 1989; Havlin y col., 1990; Logan y col., 1991; Blevens y Frye, 1993; Lal y col., 1994a, b).

Cambardella y Elliott (1992) observaron un suelo franco cuyo contenido de COS a 0- 20- cm de profundidad fue 3.1, 3.5, 3.7, y 4.2 kg m⁻² para el barbecho desnudo, cobertura de rastrojo, no labranza y pastizal natural, respectivamente. También observaron que las prácticas de labranza pueden llevar a la pérdida de 40% o más del COS total durante un período de 60 años. Edwards y col. (1992) observaron que la conversión de labranza con arado de vertedera a la no labranza aumentó el contenido de COS en la capa de 0-10 cm de 10 g kg⁻¹ a 15.5 g kg⁻¹ en 10 años -un aumento del 56%. Lal y col. (1998) declararon que “Un resumen de la literatura disponible indica que el potencial de secuestro de COS, al adoptar la labranza de conservación, varía de 0.1 a 0.5 toneladas métricas ha⁻¹ año⁻¹ en las regiones templadas húmedas y de 0.5 a 0.2 toneladas métricas ha⁻¹ año⁻¹ en las regiones semiáridas y tropicales.” Además calculan que el aumento de COS puede continuar durante un período de 25 a 50 años, según las propiedades del suelo, las condiciones climáticas y el manejo.

El secuestro de carbono del suelo posee varios beneficios además de la extracción de CO₂ de la atmósfera. El sistema de no labranza reduce el uso de combustible fósil, la erosión del suelo y, a su vez, aumenta la fertilidad del suelo y la capacidad de retención de agua. Sin embargo, los efectos beneficiosos de la labranza de conservación en el contenido de COS pueden durar poco tiempo si se ara aún después de haber practicado labranza de conservación por mucho tiempo (Gilley y Doran, 1997; Stockfisch y col., 1999). Stockfisch y col. (1999) concluyeron que la estratificación y la acumulación de materia orgánica como resultado de la labranza mínima a largo plazo se perdieron por completo con una sola práctica de labranza de inversión durante un invierno relativamente suave. La labranza acentúa la oxidación del C al aumentar la aireación del suelo y el contacto con el rastrojo del suelo, y acelera la erosión del suelo al aumentar la exposición al viento y a la lluvia (Grant, 1997). Diferentes experimentos realizados en América del Norte han comprobado la existencia de mayor contenido de COS en suelos bajo labranza de conservación en relación con las camas de siembra aradas (Doran, 1980; Doran y col. 1987; Rasmussen y Rohde, 1988; Tracy y col. 1990; Havlin y col. 1990; Kern y Johnson, 1993; Lafond y col., 1994; Reicosky y col., 1995; Reicosky, 2001b).

Varios estudios han indicado un alto potencial de secuestro de COS en los suelos europeos, de manera similar a los beneficios de la NL comprobados en América del Norte, Brasil y Argentina (Lal, 2000; Sa y col., 2001). En un análisis de 17 experimentos de labranza en Europa, Smith y col. (1998) encontraron que el aumento promedio de COS, con el cambio de labranza convencional a NL fue de 0.73 ±0.39% por año y que el COS puede alcanzar un nuevo equilibrio en aproximadamente 50 a 100 años. El estudio de experimentos a largo plazo que se realizaron en Canadá (Dumanski y col., 1998) indicaron que el COS puede ser secuestrado durante 25 a 30 años a una tasa de 50 a 75 g C m⁻² año⁻¹, según el tipo de suelo en un suelo Cherozem bien fertilizado y un luvisol cultivado de manera continua con cereales y heno. El análisis de estos experimentos de Canadá se centró en las rotaciones de cultivo, como oposición a la labranza, y es único ya que consideró tasas de secuestro de C según el tipo de suelo.

En términos generales, West y Post (2002) sugirieron que las tasas de secuestro de C del suelo con un cambio de prácticas de NL pueden tener una respuesta tardía, alcanzar una tasa pico de secuestro en cinco a 10 años, y luego disminuir a casi 0 en 15 a 20 años según el análisis de regresión. Esto concuerda con una reseña realizada por Lal y col. (1998) basada en los resultados obtenidos por Franzluebbers y Arshad (1996) que puede haber un aumento mínimo (si lo hay) de COS en los primeros dos a cinco años después del cambio de práctica de manejo, seguido por un gran aumento en los siguientes cinco a 10 años. Campbell y col. (2001) concluyeron que los sistemas de rotación de trigo de Canadá alcanzarán un equilibrio después del cambio a no labranza después de 15 a 20 años, siempre que las condiciones climáticas promedio permanezcan constantes. Lal y col. (1998) estiman que las tasas de secuestro de C pueden continuar durante un período de 25 a 50 años. Se pueden obtener diferentes cálculos de secuestro de C según las diferentes rotaciones y la diversidad de la rotación que se practique.

Se está revisando el concepto de que cada suelo posee una capacidad finita de almacenamiento de C. Esto tiene implicancias importantes en la productividad del suelo y en el potencial de utilizar el suelo para aumentar el almacenamiento de C y reducir los gases de efecto invernadero de la atmósfera. La mayoría de los suelos agrícolas degradados pueden ofrecer reservas potenciales importantes de CO₂ atmosférico. Sin embargo, la acumulación de C en el suelo no continúa aumentando con el tiempo con mayores entradas de C sino que alcanza un límite superior o un nivel de saturación de carbono que determina el límite superior de la reserva de C del suelo (Goh, 2004). La relación entre la NL y la LC respecto al modo en que afectan a las reservas de C del suelo se encuentra abierta a debate y definición de las pools de carbono. Dentro del marco de un concepto de saturación de C del suelo recientemente propuesto, Six y col (2002) evaluaron la relación existente entre los cambios inducidos por la labranza en la estructura del suelo y la posterior pérdida de C. Diferencian la MOS protegida de la descomposición a través de diferentes mecanismos de la MOS que no está protegida y discuten las consecuencias de dichos cambios de manejo de la tierra en los procesos que afectan la liberación de C. Este nuevo modelo define una capacidad de saturación de C del suelo o un máximo potencial de almacenaje de C, determinado por las propiedades físico-químicas del suelo y se diferencia de los modelos que sugieren que las reservas de C del suelo aumentan de manera lineal con las entradas de C. Se supone, que esta capacidad de saturación de C serán específicas según el suelo, clima y manejo. Esto provoca un cambio de pensamiento respecto al secuestro de C y al hecho de que puede existir un límite natural dependiente del suelo tanto en los sistemas naturales como en los agroecosistemas. Superpuesto a este análisis se encuentra el rol de la glomalina, una sustancia pegajosa producida por las hifas fúngicas que contribuyen con la formación de agregados del suelo (Nichols y Wright, 2004). La no labranza es una de las prácticas de manejo que ha aumentado la existencia de hongos hifales que producen glomalina. El próximo desafío será determinar si la saturación de C y la glomalina que se encuentra en todo el perfil en los sistemas de NL y LC son sustancialmente diferentes. Se supone que con la destrucción de los agregados del suelo inducida por una labranza menos intensiva, la NL puede tener una ventaja respecto de la LC. Se necesita investigar un poco más para conocer la respuesta final.

Además, la agricultura altera el ciclo del nitrógeno terrestre. A través de la fertilización nitrogenada, el cultivo anual, el monocultivo, y el manejo inadecuado de agua, el nitrógeno es más propenso a perderse en el agua subterránea o superficial y en la atmósfera. El óxido nitroso (N₂O), una emisión común de los suelos agrícolas, es un gas de efecto invernadero potente (310 veces más potente que el CO₂) que ha aumentado su concentración atmosférica en un 15% durante los dos últimos siglos (Mosier y col., 1998). Estas concentraciones se pueden reducir con un mejor manejo del nitrógeno, así como también con el manejo del agua de riego ya que el N₂O se genera bajo condiciones aeróbicas (donde hay nitrificación) y anaeróbicas (donde hay desnitrificación) en el suelo.

Debido a los ciclos de C y N estrechamente conectados, los cambios en las tasas de secuestro de C y en los ecosistemas terrestres afectarán directamente a los procesos de cambio de N en los suelos y al intercambio biosfera-atmósfera de los compuestos de N gaseoso. Algunos datos sugieren que el aumento de las emisiones de N₂O pueden estar estrechamente relacionadas con el aumento de secuestro de C del suelo (Robertson y col., 2000; Mosier y col. 1991; Vinther, 1992; Mackenzie y col. 1998). Si la NL es una práctica de manejo verdaderamente viable, debe mitigar el impacto general de la adopción de la NL reduciendo el potencial de calentamiento global neto determinado por los flujos de todos los gases de efecto invernadero, incluyendo el

N₂O y CH₄ (metano). Six y col. (2004) calcularon la mitigación del calentamiento global potencial con la adopción de la NL en regiones templadas mediante la recopilación de toda la información disponible que muestra las diferencias en los flujos del C, N₂O y del CH₄ que derivan del suelo entre los sistemas de labranza convencional (LC) y los de no labranza (NL). Dicho análisis indicó que, al menos durante los primeros diez años, el cambio de labranza convencional a NL podría generar un aumento en las emisiones de N₂O en los ambientes húmedos y podría reducir un poco las emisiones en los ambientes secos que podrían compensar parte de las ganancias del secuestro de C potencial, y que después de 20 años, las emisiones de N₂O podrían volver a ser iguales o inferiores a los flujos de la labranza convencional. Encontraron que las emisiones de N₂O con un alto potencial de calentamiento global influyen en gran medida en la tendencia del potencial de calentamiento global neto lo que sugiere que es esencial un mejor manejo del N para obtener un beneficio pleno del almacenamiento de C en el suelo para propósitos de mitigación del calentamiento global. Sugirieron caución en la promoción de la agricultura de NL para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y que el forzamiento radiactivo total requiere de mayor consideración más allá del beneficio del secuestro de carbono. También indicaron que es fundamental investigar los efectos a largo y corto plazo de las diferentes estrategias de manejo de N para reducir a largo plazo los flujos de N₂O bajo condiciones de NL. Estos resultados indican la necesidad de una investigación más elemental respecto de las emisiones de N₂O durante la transición de labranza convencional a siembra directa y después de que se hayan alcanzado las condiciones de equilibrio para cuantificar los efectos de la compensación de C en el potencial del calentamiento global adecuadamente.

La literatura cuenta con pruebas significantes sobre el hecho de que la labranza intensiva disminuye el C del suelo, y promueve la adopción de nuevas y mejores formas de labranza de conservación o siembra directa para preservar o aumentar la MOS (Lal y col., 1998; Paul y col., 1997; y Reicosky y col., 1995). Según las pérdidas de C del suelo como consecuencia de la agricultura intensiva, revertir la tendencia decreciente del C del suelo con menos intensidad de labranza podría ser beneficioso para la agricultura y la población global al obtener mayor control del balance de C global (Houghton y col., 1983; Schlesinger y col., 1985). Los beneficios ambientales y económicos de la labranza de conservación y de la SD requiere de la consideración respecto del desarrollo de mejores prácticas de manejo para una producción sustentable. Sin embargo, los beneficios de la SD en el secuestro de carbono puede ser suelo o sitio específica, y la mejora del COS puede ser inconsecuente en los suelos de textura fina y con drenaje ineficiente (Wander y col., 1998). Six y col. (2004) indicaron que el potencial de mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI) de la agricultura de SD depende mucho del tiempo, demostrando así que la mitigación de los GEI a través de la adopción de la SD es mucho más variable y compleja que lo que se pensaba anteriormente.

En Brasil la mayoría de los estudios, no todos, indican que la introducción de la CL aumenta la MOS (Bayer y col., 2000a, b; Sa y col., 2001). Sisti y col. (2004) evaluaron los cambios en el C del suelo en un estudio de 13 años que compara tres rotaciones diferentes de cultivos bajo el sistema de LCero y LC en un oxisol arcilloso muestreado a 100 cm. Encontraron que bajo una secuencia continua de trigo de invierno y soja de verano, la reserva de C del suelo a 100 cm bajo LCero no fue muy diferente de la de LC. Sin embargo, las rotaciones con cultivo de vicia, las reservas de C del suelo fueron significativamente superiores bajo LCero que bajo LC. Concluyeron que la contribución de la fijación de N por el cultivo de legumbres fue el principal responsable de la acumulación de C observada en el suelo bajo LCero. Los resultados demuestran la importancia que tienen las rotaciones de diferentes cultivos, especialmente las que incluyen legumbres que aportan N orgánico bajo LCero, en la acumulación de C del suelo. Sist. y col., (2004) encontraron que gran parte de la ganancia de N tuvo lugar a profundidades inferiores a la capa de arado, lo que sugiere que la mayor parte del C del suelo acumulado derivó de los residuos de las raíces de los cultivos.

Los sistemas de cultivo y la fertilización de N afectan la producción de biomasa vegetal, controlando parcialmente la entrada de C orgánico a las reservas de MOS. Un trabajo más exhaustivo de Brasil refleja la importancia del manejo del suelo y los efectos del manejo de las plantas en el C del suelo y las pérdidas de N a 1 m de profundidad (Diekow y col. 2005). Evaluaron las pérdidas de C y N durante el período de cultivo convencional posterior a la pradera nativa y un sistema de cultivo basado en legumbres y cereales bajo SD por 17 años con distintos niveles de fertilización de N para aumentar las reservas de C y de N. Con la fertilización de N, las reservas de C y de N de la rotación avena/maíz fueron constantes con el tiempo. Sin embargo,

observaron que las reservas de C y N aumentaron debido a una mayor entrada de residuos en los sistemas de cultivo basados en legumbres. Los sistemas de cultivo basados en legumbres bajo NL a largo plazo y la fertilización de N mejoraron las reservas de C y de N del suelo de la tierra previamente cultivada, y alcanzaron los valores originales de la pradera nativa. El nitrógeno y los residuos de las legumbres en la rotación fueron más eficientes para formar reservas de C en el suelo que el N inorgánico del fertilizante aplicado al cultivo de gramíneas en la rotación. Además, el N de la legumbre evita el costo de utilizar combustibles fósiles para fabricar fertilizante de N. El cambio del suelo predominante tuvo lugar en la capa superficial; sin embargo, las capas más profundas fueron importantes para el almacenaje de C y de N que lleva a mejor calidad ambiental y del suelo.

Uso de energía y emisiones de carbono en la producción de siembra directa

Se requiere de energía para todas las prácticas agrícolas. La agricultura intensiva moderna requiere de mucho más insumo de energía que los métodos agrícolas tradicionales ya que se basa en el uso de combustibles fósiles para la labranza, el transporte, el secado de granos, y la manufactura de fertilizantes, pesticidas, y el equipo para aplicar los insumos agrícolas, y para generar la electricidad que se utiliza en los establecimientos (Frye, 1984). Las tareas de labranza y cosecha dan cuenta del mayor consumo de combustible dentro de los sistemas agrícolas intensivos. Frye (1984) encontró que los requerimientos de combustible bajo sistemas de NL o labranza reducida fueron del 55 y 78%, respectivamente, en relación al que se utilizó en los sistemas convencionales que incluyeron el arado de vertedera. En términos de área, se ahorró de 23 kg C ha⁻¹ año⁻¹ en los costos de energía en la conversión de labranza convencional a no labranza. Para los 186 millones ha de tierra cultivable de EE.UU., esto se traduce en un ahorro de C potencial de 4.3 MMTCE año⁻¹. Kern y Johnson (1993) calcularon que la conversión del 76% de tierra cultivable sembrada en los EE.UU. a labranza de conservación podría secuestrar de 286 a 468 MMTCE en 30 años y concluyeron que la agricultura de dicho país podría convertirse en una reserva neta de C. Lal (1997) hizo un cálculo global del secuestro de C a partir de la conversión de labranza convencional a la de conservación y obtuvo una suma de 4,900 MMTCE para el año 2020. La combinación de la economía en las reducciones de costo de combustible y los beneficios ambientales que derivan del cambio a la labranza de conservación son los primeros pasos positivos de la agricultura hacia una disminución de emisiones de C a la atmósfera.

Las prácticas que requieren menor insumo de energía, como la NL en oposición a la labranza convencional, generalmente obtienen como resultado menor insumo de combustible y una consecuente disminución de las emisiones de CO₂-C a la atmósfera por unidad de área de tierra que se cultiva. Las emisiones de CO₂ de la agricultura, por lo general, se generan a partir de cuatro fuentes primarias: la manufactura y el uso de maquinaria para cultivar la tierra, la producción y aplicación de fertilizantes y pesticidas, el COS que se oxida después del disturbio del suelo según las prácticas de labranza, y la energía que se requiere para el riego y el secado de granos. West y Marland (2002) realizaron un análisis del ciclo de C completo para los insumos agrícolas, y obtuvieron cálculos del flujo de C neto para tres tipos de cultivo bajo las tres intensidades de labranza. El análisis del ciclo de C completo incluye cálculos del uso de energía y las emisiones de C para combustibles primarios, electricidad, fertilizantes, cal, pesticidas, riego, producción de semillas y maquinaria agrícola. Calcularon que las emisiones de CO₂-C de la maquinaria utilizada en tareas agrícolas para las prácticas de labranza de conservación, reducida o no labranza fueron de 72, 45, y 23 kg C ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Los valores de las emisiones de C total se utilizaron en conjunto con los cálculos del secuestro de C para obtener el flujo de C neto a la atmósfera con el transcurso del tiempo. Según los insumos promedio del cultivo de los EE.UU., la no labranza emitió menos CO₂ con las tareas agrícolas que la labranza convencional con 137 y 168 kg de C ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. El efecto de los cambios en el uso de combustible fósil es el factor dominante 40 años después de la conversión a NL. Este análisis de datos disponibles en la agricultura estadounidense sugiere que, en promedio, un cambio de labranza convencional a no labranza no sólo secuestrará C en el suelo sino que también reducirá las emisiones de CO₂. Si bien el mayor secuestro de C continuará por un tiempo determinado hasta que se alcance un nuevo equilibrio, la reducción en el flujo neto de CO₂ a la atmósfera, causado por un menor uso de combustible fósil, puede continuar indefinidamente siempre que se continúe con las prácticas alternativas.

Lal (2004) brindó una síntesis del uso de energía en las tareas agrícolas y su conversión a equivalentes de C (EC). La ventaja principal de expresar el uso de energía en términos de emisión de C como kg CE se basa en la relación directa con la tasa de enriquecimiento de la concentración atmosférica de CO₂. Las tareas analizadas fueron prácticas agrícolas intensivas que incluyeron labranza, pulverización química, siembra, cosecha, fertilización con nutrientes, cal, manufactura de pesticidas y riego. Las emisiones de los diferentes métodos de labranza fueron 35.3, 7.9, y 5.8 kg CE ha⁻¹ para la labranza convencional, arado de cincel o labranza mínima y los métodos de NL de preparación de la cama de siembra, respectivamente. Estos resultados sustentan la eficiencia de energía de la no labranza. La conversión de la labranza convencional a la NL, utilizando manejo integrado de nutrientes y prácticas de manejo de plagas, y una mayor eficiencia de uso de agua puede disminuir las emisiones de C y, al mismo tiempo, aumentar la pool de C del suelo. De este modo, la adopción de técnicas de agricultura de conservación es un enfoque holístico del manejo de los recursos del suelo y del agua. La agricultura de conservación mejora la eficiencia y aumenta la productividad por consumo de unidad de insumos derivados del C y, además, es una estrategia sustentable que requiere del respaldo de una política global.

¿Qué es el Protocolo de Kyoto?

El Protocolo de Kyoto es un acuerdo internacional que establece objetivos para que los países industrializados reduzcan las emisiones de GEI y puedan brindar incentivos económicos para el manejo del carbono. El Protocolo de Kyoto es una enmienda de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), un tratado internacional sobre el calentamiento global. También reafirma las secciones de la CMNUCC. Los países que ratifican dicho protocolo se comprometen a reducir las emisiones de CO₂ y los otros cinco gases de efecto invernadero o se comprometen en la negociación de emisiones si mantienen o aumentan las emisiones de dichos gases, que han estado vinculados con el calentamiento global. Se considera que estos gases son, al menos parcialmente, responsables del calentamiento global – el aumento de la temperatura global que puede tener consecuencias catastróficas en la vida terrestre. El nombre formal del acuerdo propuesto, que reafirma las secciones de la CMNUCC, es el Protocolo de Kyoto para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (<http://www.cnn.com/SPECIALS/1997/global.warming/stories/treaty/>). El protocolo fue negociado en Kyoto, Japón, en diciembre de 1997, abierto a firma el 16 de marzo de 1998 y cerrado el 15 de marzo de 1999. El acuerdo entró en vigencia el 16 de febrero del 2005 después de su ratificación oficial por parte de Rusia el 18 de noviembre de 2004.

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC), bajo la CMNUCC, aún está elaborando los requerimientos detallados para un sistema de cuentas del C. El PICC se encuentra en proceso de desarrollar la *Guía de Buenas Prácticas y Manejo de Incertidumbre en los Inventarios Nacionales de Gas de Efecto Invernadero*. Este documento pretende presentarse en la 9^o Conferencia de las Partes (COP9) para la CMNUCC. Toda norma que dé cuentas del C que se haya elaborado antes de este documento necesitará ser modificada para ser consistente con el documento del PICC antes de que los créditos de C generados de las reservas de C puedan utilizarse en un régimen de negociación de emisiones bajo el Protocolo de Kyoto. El Protocolo de Kyoto puede hacer referencia al concepto de créditos de carbono de distintas maneras: Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) es un proyecto entre los países Anexo I y II, Implementación Conjunta (IC) con los proyectos entre los países Anexo I, Negociación de Emisiones (NE) que permite la transferencia de una cantidad asignada de unidades de la negociación de créditos de carbono en el ámbito local e internacional. Los dos tipos de créditos y mercados de carbono admiten Unidades de Reducción de las Emisiones (URE) que son más permanentes en su naturaleza y se comercializan como una commodity. Las Unidades de Eliminación de las Emisiones (UEE) no son permanentes y se negocian como usufructo. El protocolo establece un período de compromiso que rige del 2008 hasta el 2012. Los 30 países industrializados que firmaron para reducir las emisiones deben demostrar que lo han cumplido durante los cinco años. El objetivo del Protocolo de Kyoto fue reducir las emisiones globales de los GEI de dichos países en un 5.2% por debajo de los niveles de 1990 (Grubb y col. 1999). En la actualidad, los créditos de carbono del suelo son reconocidos pero no considerados como parte del protocolo de Kyoto. El desarrollo de mercados internacionales de negociación de carbono brindarán incentivos económicos que finalmente permitirán que los créditos de carbono del suelo se admitan junto con los beneficios económicos. Actualmente, existe un grado de incertidumbre para los inversores y los potenciales inversores en las reservas de

C relacionadas a los bosques durante respecto de las reglas específicas que se aplicarán a la implementación de las provisiones de las reservas del Protocolo de Kyoto. Los inversores y los potenciales inversores en las reservas de C deben ser concientes de que existe incertidumbre a nivel internacional. Los costos de administración y transacción podrían tener un rol fundamental en la determinación del éxito de cualquier sistema de negociación de créditos de C. Se espera que se minimice el costo de estas áreas a través de mejores técnicas y servicios para medir e informar el C secuestrado, los asesores del sector privado, las economías de escala, y la emergencia de mecanismos y estrategias de mercado como la formación de pools o el agregado de C. Hay riesgos implícitos en la venta de créditos de C si se realiza antes de cualquier sistema de negociación internacional formalizado y aquellos que participen de la misma deben aclarar las responsabilidades y obligaciones. Sin embargo, debe tenerse mucho cuidado con la creación de dichas políticas para asegurar el éxito de las mismas y para evitar consecuencias ambientales y económicas no buscadas y, además, para brindar un máximo beneficio social.

Resumen

La agricultura de siembra directa y las prácticas relacionadas de secuestro de carbono puede llevar a una mejor calidad del agua y del aire, un mejor hábitat para la vida silvestre y además mitigar el efecto invernadero y posiblemente servir como una fuente de ingresos para los agricultores. El secuestro de carbono por sí sólo no puede solucionar el dilema del cambio climático, pero a medida que busquemos avances tecnológicos e incentivos económicos que nos permitan crear energía con menos polución, y a medida que continuemos investigando la causa y los efectos potenciales del cambio climático, tiene sentido que aumentemos un proceso natural que ya sabemos que tiene el beneficio de reducir las concentraciones existentes de gases de efecto invernadero, especialmente cuando este proceso también mejora la calidad del agua, la fertilidad del suelo y el hábitat para la vida silvestre. A medida que cambiemos el manejo, los beneficios de las propiedades del suelo y la calidad ambiental pueden aparecer en varias formas. La primera forma es una mejor estructura del suelo, con una estructura superficial más estable y menos propensa a plancharse y menos susceptible a la erosión. La infiltración del agua podría mejorar, implicando un menor escurrimiento superficial. A medida que la MOS aumenta, la capacidad de los nutrientes y del agua del suelo aumenta significativamente. Y los cultivos resistirán mejor la sequía debido a una mejor infiltración y una mejor capacidad de retención de agua. La materia orgánica del suelo y la población biológica del suelo aumentarán en cantidad y nivel de actividad con rotaciones de cultivos más diversos. La materia orgánica también puede suprimir organismos de enfermedad, y mejorar la salud y el vigor del cultivo a medida que aumenta la diversidad y la actividad biológica del suelo. Puede haber mejoras en la calidad del agua a medida que las cargas de sedimento y nutrientes disminuye en el agua superficial a partir de una mejor agregación del suelo, en la calidad del aire ya que el polvo, los alérgenos y los patógenos del aire disminuyen, y también en la productividad agrícola. La ratificación y la promulgación del Protocolo de Kyoto acarreará incentivos económicos para una aceptación más rápida de las prácticas de agricultura de conservación. Aceptar los desafíos de mantener la seguridad alimentaria incorporando almacenaje de C en la planificación de conservación demuestra preocupación por los recursos globales y nuestro deseo de trabajar en armonía con la naturaleza. Esta preocupación presenta un rol positivo de la agricultura de conservación que tendrá un impacto importante en la sustentabilidad global y en nuestra futura calidad de vida.

Referencias

- Bayer, C., L. Martin-Neto, J. Mielniczuk, and C.A. Ceretta. 2000a. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy loam Acrisol from southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. *Soil Till. Res.* 53:95-104.
- Bayer, C., J. Mielniczuk, T.J.C. Amado, L. Martin-Neto, and S.V. Fernandes. 2000b. Organic matter storage in a sandy loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil Till. Res.* 54:101-109.
- Blevens, R.L., and W.W. Frye, 1993. Conservation tillage: An ecological approach to soil management. *Adv. Agron.* 51:37-78.
- Cambardella, C.A., and E.T. Elliott. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:777-783.

- Campbell, C.A., F. Selles, G.P. Lafond, and R.P. Zentner. 2001. Adopting zero tillage management: impact on soil C and N under long-term crop rotations in a thin Black Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 81:139-148.
- Dick, W.A., D.A. Van Doren, G.D. Triplett, Jr., and J.E. Henry. 1986a. Influence of long-term tillage and crop rotation combination on crop yields and selected soil parameters. The results obtained for a Typic Fragiudalf soil. *Res. Bull.* 1180. OSU and OARDC, Wooster, Ohio.
- Dick, W.A., D.A. Van Doren, G.D. Triplett, Jr., and J.E. Henry. 1986b. Influence of long-term tillage and crop rotation combination on crop yields and selected soil parameters. II, The results obtained for a Typic Fragiudalf soil. *Res. Bull.* 1181. OSU and OARDC, Wooster, Ohio.
- Diekow, J., J. Mielniczuk, H. Knicker, C. Bayer, D.P. Dick, and I. Kögel-Knabner. 2005. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. *Soil Till. Res.* **81:87-95**.
- Doran, J.W. 1980. Microbial changes associated with residue management with reduced tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:518-524.
- Doran, J.W., D.G. Fraser, M.N. Culik, and W.C. Leibhardt. 1987. Influence of alternative and conventional agricultural management on soil microbial processes and N availability. *Am. J. Alternative Agric.* 2:99-106.
- Dumanski, J., R.L. Desjardins, C. Tarnocai, D. Monreal, E.G. Gregorich, V. Kirkwood, and C.A. Campbell. 1998. Possibilities for future carbon sequestration in Canadian agriculture in relation to land-use changes. *Clim. Change* 40:81-103.
- Edwards, J.H., C.W. Wood, D.L. Thurlow, and M.E. Ruf. 1992. Tillage and crop rotation effects on fertility status of a Hapludalf soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1577-1582.
- Follett, R.F. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil Till. Res.* 61:77-92.
- Grubb, M., C. Vrolijk, and D. Brack. 1999. *The Kyoto Protocol - A guide and assessment*. London: Earthscan.
- Franzluebbers, A.J., and M.A. Arshad. 1996. Soil organic matter pools during early adoption of conservation tillage in northwestern Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1422-1427.
- Frye, W.W. 1984. Energy requirements in no tillage. p. 127-151. *In* R.E. Phillips and S.H. Phillips (ed.) *No-tillage agricultural principles and practices*. VanNostrand Reinhold, New York.
- Garcia-Torres, L., J. Benites, and A. Martinez-Vilela. 2001. Conservation agriculture: A worldwide challenge. *Proc. World Congr. Conservation Agriculture*, 1st, Madrid, Spain. 1-5 Oct., 2001. XUL, Cordoba, Spain. pp 387.
- Gilley, J.E., and J.W. Doran. 1997. Tillage effects on soil erosion potential and soil quality of a former conservation reserve program site. *J. Soil Water Conserv.* 52:184-188.
- Goh, K.M. 2004. Carbon sequestration and stabilization in soils: implications for soil productivity and climate change. *Soil Sci. Plant Nutr.* 50:467-476.
- Havlin, J.L., D.E. Kissel, L.D. Maddux, M.M. Classen, and J.H. Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:448-452.
- Kern, J.S., and M.G. Johnson. 1993. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:200-210.
- Lafond, G.P., D.A. Derksen, H.A. Loepky, and D. Struthers. 1994. An agronomic evaluation of conservation tillage systems and continuous cropping in East Central Saskatchewan. *J. Soil Water Conserv.* 49:387-393.
- Lal, R. 2004. Carbon emission from farm operations. *Environ. Int.* 30:981-990.
- Lal, R. 1989. Conservation tillage for sustainable agriculture: Tropics vs temperate environments. *Adv. Agron.* 42:1073-1082.
- Lal, R. 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂ enrichment. *Soil Till. Res.* 43:81-107.
- Lal, R. 1984. Soil erosion from tropical arable lands and its control. *Adv. Agron.* 37:183-248.
- Lal, R. 2000a. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Adv. Agron.* 71:145-191.
- Lal, R. 2000b. A modest proposal for the year 2001: we can control greenhouse gases in the world..... with proper soil management. *Journal of Soil and Water Conservation* 55(4):429-433.
- Lal, R., J.M. Kimble, R.F. Follet, and V. Cole. 1998. Potential of U.S. cropland for carbon sequestration and greenhouse effect mitigation. Ann Arbor Press, Chelsea, MI. 128 pp.

- Lal, R., T.J. Logan, D.J. Eckert, W.A. Dick, and M.J. Shipitalo. 1994a. Conservation tillage in the corn belt of the United States. p. 73-114. *In* M.R. Carter (ed). Conservation Tillage in Temperate Agroecosystems. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Lal, R., A.A. Mahboubi, and N.R. Fausey. 1994b. Long-term tillage affects on Mollic Ochraqualf in northwestern Ohio. III. Soil nutrient profile. *Soil Till. Res.* 15:371-382.
- Logan, T.J., R. Lal, and W.A. Dick. 1991. Tillage systems and soil properties in North America. *Soil Tillage Res.* 20:241-270.
- McKenzie, A.F., M.X. Fan, and F. Cardin. 1998. Nitrous oxide emission in three years as affected by tillage, corn-soybeans-alfalfa rotations and nitrogen fertilization. *J. Environ. Qual.* 27:698-703.
- Mosier, A., C. Kroeze, C. Nevison, O. Oenema, S. Seitzinger and O. Van Cleemput. 1998. Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 52:225-248.
- Mosier, A., D. Shimel., D. Valentine, K. Bronson, and W. Parton. 1991. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature* 350:330-332.
- Nichols, K.A. and S.F. Wright. 2004. Contributions of soil fungi to organic matter in agricultural soils. p. 179-198. *In* F. Magdoff and R. Weil (ed.) Functions and management of soil organic matter in Agroecosystems. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Paul, E., K. Paustian, E.T. Elliott, and C.V. Cole. (ed.) 1997. Soil organic matter in temperate agroecosystems: Long-term experiments in North America. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Rasmussen, P.E., and C.R. Rohde. 1988. Long-term tillage and nitrogen fertilization affects on organic N and C in a semi-arid soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:596-600.
- Reicosky, D.C. 2001a. Conservation agriculture: Global environmental benefits of soil carbon management. p. 3-12. *In* L. Garcia-Torres et al. (ed.) Conservation agriculture: A worldwide challenge. XUL, Cordoba, Spain.
- Reicosky, D.C. 2001b. Tillage-induced CO₂ emissions and carbon sequestration: Effect of secondary tillage and compaction. p. 265-274. *In* L. Garcia-Torres et al. (ed.) Conservation agriculture: A worldwide challenge. XUL, Cordoba, Spain.
- Reicosky, D.C., S.D. Evans, C.A. Cambardella, R.R. Allmaras, A.R. Wilts, and D.R. Huggins. 2002. Continuous corn with moldboard tillage: Residue and fertility effects on soil carbon. *J. Soil Water Conserv.* 57(5):277-284.
- Reicosky, D.C., W.D. Kemper, G.W. Langdale, C.W. Douglas Jr., and P.E. Rasmussen. 1995. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Water Conserv.* 50:253-261.
- Robertson, G.P., E. Paul, and R.R. Harwood. 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: contribution of individual guesses to the radiate of forcing of the atmosphere. *Science* 289:1922-1925.
- Sa, J.C.D., C.C. Cerri, W.A. Dick, R. Lal, S.P. Venske, M.C. Piccolo, B.E. Feigl. 2001. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1486-1499.
- Schlesinger, W.H. 1985. Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. p. 194-220. *In* J.R. Trabalha et al. (ed.) The changing carbon cycle: A global analysis. Springer Verlag, New York.
- Sisti, C.P.J., H.P. dos Santos, R. Kohhann, B.J.R. Alves, S. Urquiaga, and R.M. Boddey. 2004. Changing carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Till. Res.* 76:39-58.
- Six, J., R.T. Conant, E.A. Paul, and K. Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant Soil* 241:155-176.
- Six, J., S.M. Ogle, F.J. Breidt, R.T. Conant, A.R. Mosier, and K. Paustian. 2004. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long-term. *Global Change Biol.* 10:155-160.
- Smith, P., D.S. Powlson, M.J. Glendining and J.U. Smith. 1998. Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Global Change Biol.* 4:679-685.
- Stockfisch, N., T. Forstreuter, and W. Ehlers. 1999. Ploughing effects on soil organic matter after 20 years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. *Soil Till. Res.* 52:91-101.
- Tebregge F, Guring R A. 1999. Reducing tillage intensity – a review of results from a long-term study in Germany. *Soil Tillage Research* 53:15-28.

- Tisdall, J.M. 1996. Formation of soil aggregates in the accumulation of soil organic matter. p 57-96. *In* M.R. Carter and B.A. Stewart (ed.) Structure and soil organic matter storage in agricultural soils. Advances in Soil Science. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Tracy, P.W., D.G. Westfall, E.T. Elliott, G.A. Peterson, and C.V. Cole. 1990. Carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur mineralization in plow and no-till cultivation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:457-461.
- Uri, N D. 1999. Conservation Tillage in U.S. Agriculture. *In Environmental, Economic, and Policy Issues*, p 130. Binghamton, NY: The Haworth Press, Inc.
- Vinther, F.P. 1992. Measured in simulated denitrification activity in a cropped sandy and loamy soil. *Biol. Fertil. Soils* 14:43-48.
- Wander, M.M., M.G. Bidar, and S. Aref. 1998. Tillage impacts on depth distribution of total and particular organic matter in three Illinois soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1704-1711.
- West, T.O., and G. Marland. 2002. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agric. Ecosyst. Environ.* 91:217-232.
- West, T.O. and W.M. Post. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1930-1946.