

Agricultura de conservación, ¿mejora la calidad del suelo a fin de obtener sistemas de producción sustentables?

Nele Verhulst, Isabelle
François, Bram Govaerts



Modernización Sustentable
de la Agricultura Tradicional



Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo

Agricultura de conservación, ¿mejora la calidad del suelo a fin de obtener sistemas de producción sustentables?

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, ¿mejora la calidad del suelo a fin de obtener sistemas de producción sustentables?

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. Producción de alimentos y degradación de la tierra

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. Se ha estimado que la actividad humana es responsable de la pérdida de 26 mil millones de toneladas de la capa superficial del suelo por año, lo cual es 2.6 veces la tasa natural de degradación del suelo. Se ha estimado que la erosión causa daños por USD \$44 mil millones al año en suelos, cuerpos de agua, infraestructura y salud. Los rendimientos de los cultivos en EE. UU. caerán 8 % por año si los agricultores no pueden reemplazar la pérdida de los nutrientes y el agua (Pimentel *et al.*, 1995).

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.

1.2. Agricultura de conservación

En la actualidad, las personas han 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 los niveles adecuados 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. Por ejemplo, en condiciones con riego por gravedad, un sistema de camas permanentes con riego por surcos (figura 1) puede ser más adecuado y sustentable que un sistema cero labranza o labranza reducida sobre plano para reemplazar el ampliamente usado sistema de labranza convencional con riego por inundación sobre terrenos planos.

1.3. Calidad del suelo

Al evaluar la sustentabilidad de un sistema de manejo agrícola, la pregunta central es: ¿cuál sistema de producción no agotará los recursos naturales, optimizará las condiciones del suelo y reducirá la vulnerabilidad de la producción de alimentos, al mismo tiempo que mantiene o aumenta la productividad? La calidad del suelo es el paso práctico de este concepto a la sustentabilidad. La calidad del suelo se puede definir de la siguiente manera:

- La capacidad de un tipo de suelo específico para funcionar, dentro de los límites del ecosistema manejado de forma natural, para sustentar la productividad vegetal y animal, mantener o aumentar la calidad del agua y del aire, y mantener la salud humana y el asentamiento.
- El grado de aptitud de un suelo para un uso específico.
- La capacidad del suelo para mantener una alta productividad, sin la degradación importante del suelo o del ambiente.

La evaluación de la calidad del suelo se basa en sus características físicas, químicas y biológicas. Los factores del manejo tales como la labranza y el manejo de residuos pueden modificar la calidad del suelo. Sin embargo, los cambios en la calidad del suelo no solo se asocian con el manejo, sino con el contexto ambiental, tal como la temperatura y la precipitación. Una evaluación comparativa de la calidad del suelo es en la que el desempeño del sistema es determinado en relación con las alternativas. Se comparan los atributos bióticos y abióticos del sistema edáfico de todos los sistemas

alternos en el tiempo. Este tipo de comparación es útil para determinar el impacto de los sistemas de manejo que se han puesto en práctica durante un periodo de tiempo.

2. Influencia de la agricultura de conservación sobre la calidad física del suelo

2.1. Estructura y agregación del suelo

La estructura del suelo es un factor clave en el funcionamiento del suelo y es un importante factor en la evaluación de la sustentabilidad de los sistemas de producción de cultivos. Se ha definido como el tamaño, forma y arreglo de los sólidos y vacíos, continuidad de los poros y vacíos, su capacidad para retener y transmitir líquidos y sustancias orgánicas e inorgánicas, y la capacidad de sustentar el crecimiento y desarrollo de raíces vigorosas (figura 2). Con frecuencia, la estructura del suelo se expresa como el grado de estabilidad de agregados.

La estabilidad estructural del suelo es la capacidad de los agregados de permanecer intactos cuando se exponen a diferentes condiciones extremas. Con frecuencia se usa la agitación de los agregados sobre una malla de alambre tanto en aire (tamizado en seco) como en agua (tamizado en húmedo) para medir la estabilidad de agregados. Con el tamizado en seco, la única condición extrema aplicada es



Figura 1. Camas permanentes con riego por surcos. No se realiza labranza en las camas, solo se les vuelve a dar forma conforme sea necesario entre los ciclos de cultivo. Se siembran de una a cuatro hileras en la parte superior de la cama, dependiendo del ancho de la cama y el cultivo, con riego en el surco. Los residuos se desmenuzan y se dejan sobre la superficie.



Figura 2. Agregados del suelo; a la izquierda, estructura definida con fauna del suelo presente; a la derecha, estructura compactada y menos agregados que a la izquierda.

la del tamizado, mientras que con el tamizado en húmedo las muestras se exponen adicionalmente al poder del agua (proceso donde el suelo se desmorona por humedecimiento rápido). Por lo tanto, el diámetro medio ponderado (DMP) de los agregados después del tamizado en seco es por lo general mayor que el DMP después del tamizado en húmedo. A continuación, trataremos los tres componentes de la agricultura de conservación y su influencia sobre la estructura del suelo.

2.1.1. Influencia de la labranza

En suelos con cero labranza y retención de residuos mejora la distribución de agregados secos en comparación con la labranza convencional. El efecto de la cero labranza sobre la estabilidad del agua es más pronunciado, con un mayor DMP para el tamizado en húmedo registrado para una amplia variedad de suelos y condiciones agroecológicas (por ejemplo, la figura 3).

En los casos en los que labranza convencional da como resultado buena distribución estructural, los componentes estructurales siguen siendo más débiles para resistir la desagregación inducida por humedecimiento rápido que en los suelos con cero labranza con retención de residuos del cultivo. Por lo tanto, los suelos de los cultivos con cero labranza con retención de residuos se vuelven más estables y menos susceptibles al deterioro estructural, mientras que los suelos cultivados con labranza son propensos a la erosión (figura 4). Este es el resultado de los efectos directos e indirectos de la labranza sobre la agregación:

- La perturbación física de la estructura del suelo por medio de la labranza da como resultado un rompimiento directo de los agregados y un incremento en el reemplazo de agregados.

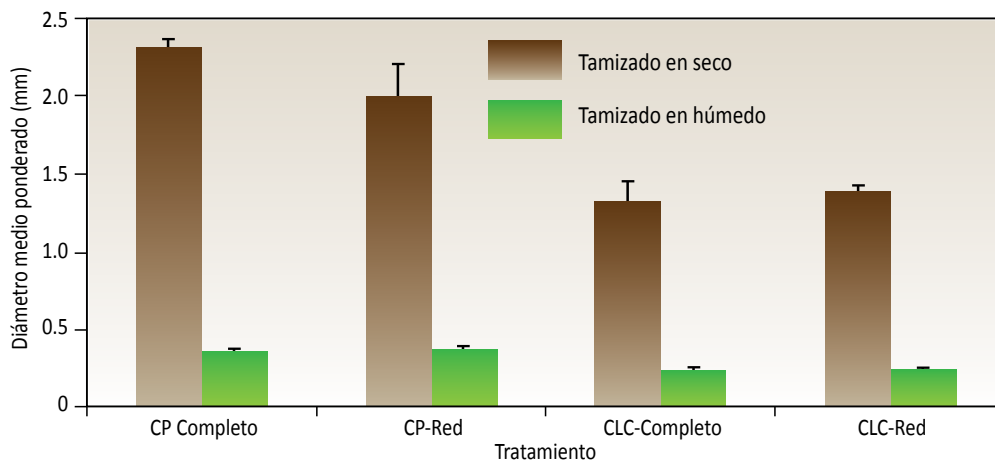


Figura 3. Efecto del manejo de la labranza y riego sobre el diámetro medio ponderado de los agregados del suelo obtenidos mediante tamizado en seco y en húmedo para el ciclo de cultivo 2008/09 en el experimento de sustentabilidad a largo plazo del CIMMYT, Valle del Yaqui, México (adaptado de Verhulst *et al.*, 2011). Las barras de error representan el error estándar de la media. CP = camas permanentes; CLC = camas con labranza convencional; Completo = riego completo; Red = riego reducido.

- La labranza también da como resultado el rompimiento de fragmentos de las raíces e hifas de micorrizas, las cuales son los principales agentes de unión para los macroagregados.
- Los residuos que yacen sobre la superficie del suelo en la agricultura de conservación protegen el suelo del impacto de las gotas de lluvia.
- Durante la labranza, tiene lugar una redistribución de la materia orgánica del suelo. Pequeños cambios en el carbono orgánico en el suelo pueden influir en la estabilidad de los macroagregados.
- La materia orgánica del suelo puede incrementar tanto la resistencia a la deformación, el poder de recuperación y la macroporosidad del suelo.
- La labranza reduce las poblaciones de macrofauna (por ejemplo, lombrices de tierra) en comparación con los sistemas de agricultura de conservación, los cuales disminuyen los efectos potencialmente positivos de la macrofauna sobre la agregación del suelo.

2.1.2. Influencia del manejo de residuos

Debido a que la materia orgánica es un factor importante en la agregación del suelo, el manejo de residuos del cultivo previo es clave para el desarrollo estructural y estabilidad del suelo. Se sabe desde hace muchos años que la adición de sustratos orgánicos al suelo mejora su estructura. El regreso de residuos del cultivo a la superficie del suelo no solo incrementa la formación de agregados, sino que también reduce la desagregación al disminuir la erosión y proteger a los agregados contra el impacto de las gotas de lluvia. El DMP de los agregados medido mediante tamizado en seco y en húmedo disminuyó con una menor cantidad de residuos retenidos en un sistema de camas permanentes de temporal. También se observó que la quema de rastrojos redujo la



Figura 4. Diferencias en la agregación entre la agricultura de conservación (izquierda) y el manejo convencional (derecha). Después de 5 años de cero labranza sobre camas permanentes, el suelo tenía significativamente más agregados estables en comparación con la labranza convencional. (Foto tomada por Castellanos-Navarrete, A., 2006).

estabilidad en agua de los agregados en las fracciones de > 2 mm y < 50 μm . Sin embargo, se debe tener en cuenta que el retiro parcial de residuos mantuvo la agregación dentro de límites aceptables. Esto indica que no siempre es necesario retener todos los residuos del cultivo en el campo para lograr los beneficios de las camas permanentes o cero labranza.

2.1.3. Influencia de la rotación de cultivos

La alteración de la rotación de cultivos puede influir en el carbono orgánico del suelo al cambiar la cantidad y calidad del aporte de materia orgánica y, por lo tanto, tiene el potencial de alterar la agregación del suelo de manera indirecta. Los cultivos pueden afectar la agregación del suelo por medio de sus sistemas radiculares debido a que las raíces de las plantas son agentes de unión importantes en la escala de macroagregados. Se observó que un suelo con cultivo de trigo tenía más macroagregados grandes que el suelo con cultivo de maíz (Lichter *et al.*, 2008). El trigo tiene un sistema radicular con crecimiento más horizontal que el maíz y la población de plantas de trigo es mayor, lo que da como resultado una red de raíces superficiales más densa. Esta red más densa puede influir de forma positiva la formación de agregados y la estabilización. Asimismo, la biomasa microbiana del suelo y la diversidad bacteriana pueden influir en la formación de agregados, así como esto puede estar influido por la rotación de cultivos. Sin embargo, existen pocos estudios sobre la influencia de la rotación de cultivos sobre la agregación del suelo.

2.2. Porosidad del suelo

Los poros tienen diferentes tamaños, formas y continuidad y estas características influyen en la infiltración, almacenamiento y drenaje del agua, el movimiento y distribución de los gases, y la facilidad de penetración en el suelo de la raíces en crecimiento. Los poros son creados por factores abióticos (por ejemplo, labranza y tránsito, congelamiento y descongelamiento, secado y humedecimiento) y por factores bióticos (por ejemplo, crecimiento de las raíces, fauna excavadora). Los cambios en las características del poro reflejan principalmente cambios en la forma, magnitud y frecuencia de las condiciones extremas impuestas sobre el suelo, la colocación de residuos del cultivo y la población de microorganismos y fauna en el suelo.

2.2.1. Densidad aparente y porosidad total

Por lo general, la porosidad total se calcula a partir de mediciones de la densidad aparente de tal manera que los términos densidad aparente y porosidad total pueden usarse indistintamente. El efecto de la labranza y del manejo de residuos sobre la densidad del suelo se limita generalmente a la capa superficial del suelo (capa arable). En capas del suelo más profundas, la densidad aparente del suelo tiende a ser similar en los suelos de cero labranza y con labranza convencional.

Se espera que una reducción en la labranza dé como resultado un cambio progresivo en la porosidad total con el tiempo, acercándose a un nuevo 'estado en equilibrio'. Sin embargo, los cambios iniciales pueden ser muy pequeños como para distinguirlos de la variación natural. En experimentos a corto plazo, no se observa un claro efecto del sistema de manejo sobre la densidad aparente —la mayoría de los estudios no encontraron diferencias significativas en la densidad aparente del suelo de cero labranza y labranza convencional. Los resultados del efecto de diferentes prácticas de labranza sobre la densidad aparente en experimentos que se han realizado durante aproximadamente 10 años son variables. En un experimento en Nueva Zelanda, se midió un incremento en la densidad aparente en suelos con cero labranza en comparación con la labranza convencional después de 10 años en un suelo de limo fino con drenaje deficiente. Sin embargo, un suelo significativamente más compactado bajo cero labranza en comparación con labranza convencional no tuvo un efecto adverso sobre el rendimiento del cultivo. Otros estudios encontraron una menor densidad aparente en cero labranza que con labranza convencional a una profundidad de 3-7 cm. La diferencia no fue evidente en las capas inferiores del suelo (Horne *et al.*, 1992).

Las diferencias en la densidad aparente entre los sistemas de labranza a largo plazo (> 15 años) han sido de alguna manera más uniformes. Casi siempre se ha observado que la densidad aparente del suelo es mayor en la capa superficial de cero labranza que en labranza convencional, pero menor por debajo de 30 cm, lo que refleja la acción de ruptura de la labranza cerca de la superficie y la formación un piso de arado por debajo de las profundidades de la labranza. Los 3 cm superiores del suelo pueden tener una densidad aparente menor en cero labranza, lo cual se atribuye al desarrollo de una composta con alto contenido de materia orgánica y posiblemente un aumento en la actividad animal.

Un experimento en campo de 15 años en China mostró la evolución de la densidad del suelo con diferentes sistemas de labranza (Li *et al.*, 2007):

- En los primeros 6 años, la densidad aparente del suelo a 20 cm de profundidad era significativamente menor con el tratamiento convencional, lo que demostraba el incremento en la densidad aparente que se presentaba en los tratamientos con cero labranza, probablemente causado por el tránsito rodado y la falta de descompactación regular del suelo.
- Sin embargo, en los siguientes 5 años, la densidad aparente media del suelo de los dos tratamientos fue similar.

- En los últimos 2 años, la densidad aparente fue ligeramente menor en el tratamiento de suelos con cero labranza con retención de residuos que en el tratamiento con labranza convencional, lo que sugiere que el efecto del tránsito sobre la densidad aparente fue anulado y se alcanzó un nuevo equilibrio con las mejoras en la condición del suelo, incluido el aumento en carbono orgánico, aumento de la actividad biótica y mejoría en la estructura.

En resumen, la introducción del suelo con cero labranza puede dar como resultado la pérdida del espacio total de poros como lo indica el incremento en la densidad aparente. Sin embargo, la pérdida de porosidad por lo general se limita a la capa arable. Hay indicios respecto a que la porosidad en los 5 cm superiores del perfil puede ser mayor en cero labranza. El grado de incremento pudiera estar en función de la acumulación de materia orgánica en esta profundidad y aumento en la actividad de la macrofauna. La adopción de un tránsito controlado cuando se hace la conversión a un suelo con cero labranza es importante para limitar la posible pérdida de espacio de poros.

Los estudios sobre el efecto de la rotación de cultivos y el manejo de residuos sobre la porosidad del suelo son escasos. Parece que en los experimentos a largo plazo, los sistemas de manejo que regresan más residuos del cultivo disminuyen la densidad aparente e incrementan la porosidad total y efectiva en comparación con los sistemas que dejan menos residuos. Mientras más residuos se dejen sobre la superficie, será menor la densidad aparente, y este efecto es muy claro en las capas de 0-3 cm y en menor grado en las de 3-10 cm (Blanco-Canqui y Lal, 2007). La retención de los residuos del cultivo en el campo es importante para prevenir compactación cuando los campos con labranza son convertidos a cero labranza.

2.2.2. Distribución del tamaño del poro y continuidad de los poros

Los cambios en la porosidad total introducidos por el manejo están relacionados con las alteraciones en la distribución del tamaño del poro. La porosidad total de los suelos está distribuida entre diferentes clases de tamaño de poro y clases de tamaño diferentes cumplen con diferentes funciones en la aireación, infiltración, drenaje y almacenamiento del agua, y

Cuadro 1. Clases de poros con diámetro y función primaria

Nombre	Diámetro	Función primaria
Macroporo	> 30 μm	Flujo de agua durante la infiltración, drenaje, aireación del suelo, lugar para el inicio del crecimiento radicular
Mesoporo	0.2-30 μm	Almacenamiento de agua para el crecimiento de la planta
Microporo	< 0.2 μm	Actividad microbiológica

ofrece una diferente resistencia mecánica al crecimiento de las raíces. En el cuadro 1 se muestran las tres clases de poros con su tamaño y función.

En general, se ha observado que la micro y mesoporosidad es más alta en cero labranza en comparación con la labranza convencional, pero en algunos casos no se ha observado algún efecto de la labranza. El efecto del manejo de residuos y rotación de cultivos sobre la distribución del tamaño del poro no se investiga por lo general; sin embargo, un estudio registró un mayor volumen de mesoporos en la capa de 0-3 cm en el suelo con cero labranza con retención de residuos que en cero labranza sin retención de residuos (Blanco-Canqui y Lal, 2007).

Los macroporos son importantes para el flujo e infiltración del agua en condiciones tanto saturadas como insaturadas. Adicionalmente, una matriz de suelo con macroporos ofrece un mayor potencial para el crecimiento radicular sin perturbaciones debido a que las raíces pueden atravesar las zonas de alta resistencia mecánica.

Cuando los suelos son convertidos a cero labranza, se puede esperar que la macroporosidad sea limitada en la zona que fue anteriormente labrada debido a procesos tales como la compactación inducida por el tránsito. Sin embargo, esta compactación puede ser compensada por una creación progresiva de macroporos por las raíces y la actividad animal con el tiempo. La disminución en la porosidad total comúnmente observada en suelos con cero labranza en comparación con suelos con labranza convencional está asociada con cambios significativos en la distribución del tamaño de los macroporos.

La infiltración, retención y flujo del agua no solo dependen de la cantidad y tamaño de los poros sino también de la interconectividad y forma de los poros. Los cambios en la morfología de los poros reflejan cambios en los procesos que crearon esos poros. Los poros con forma irregular y alargada, > 1,000 μm en diámetro y longitud, son más numerosos en suelos con labranza convencional en comparación con cero labranza a una profundidad de 0-20 cm. Esto puede atribuirse al mezclado y homogenización anuales producidos por el arado. Se observó una mayor proporción de macroporos orientados horizontalmente en la profundidad de 5-15 cm con cero labranza que con labranza convencional (VandenBygaert *et al.*, 1999). Los bioporos creados por raíces y animales tales como las lombrices de tierra pueden ser mantenidos en la capa arable en ausencia de labranza anual. Estos poros redondeados > 500 μm son más frecuentes en sistemas de cero labranza después de pocos años, incluso cuando el número total de macroporos > 1,000 μm fue mucho mayor con la labranza convencional (VandenBygaert *et al.*, 1999).

Esto puede atribuirse al mantenimiento de las raíces y los túneles de las lombrices en cero labranza a través de los años, mientras que estos son destruidos anualmente en labranza convencional. Los túneles de lombrices con excremento fueron abundantes en las parcelas con cero labranza en todas las profundidades, pero ausentes en las parcelas con labranza convencional.

2.3. Conductividad hidráulica y capacidad de retención de agua

Se esperaría que la conductividad hidráulica fuera mayor en suelos con cero labranza con retención de residuos en comparación con la labranza convencional debido a la mayor conductividad de los macroporos, la cual es el resultado de un incremento en el número de bioporos. Sin embargo, los resultados de diferentes estudios no son uniformes. Aunque en muchos estudios se observó una mayor conductividad hidráulica con cero labranza en comparación con la labranza convencional, también se ha observado que no hay un efecto significativo de la labranza y el manejo de residuos. Los diferentes resultados pueden deberse en parte a la dificultad de medir la conductividad hidráulica cuando está presente la cubierta de residuos en cero labranza. La presencia de los residuos complica la instalación de instrumentos de medición o el retiro de muestras intactas. Esto puede causar una gran variación en los valores de la conductividad en escalas pequeñas debido a los macroporos y otros atributos estructurales que se dejan intactos por la ausencia de labranza. Asimismo, las diferencias en la profundidad de muestreo del suelo, la cantidad de residuos retenidos y las características específicas del lugar (por ejemplo, textura del suelo, pendiente, labranza) entre los estudios pueden explicar las inconsistencias en los efectos observados de la labranza sobre la conductividad hidráulica y la capacidad de retención de agua.

Las prácticas de manejo del suelo que incrementan el contenido de materia orgánica pueden tener un impacto positivo sobre la capacidad de retención de agua del suelo. Se ha observado que la capacidad de retención de agua se incrementa cuando aumenta la cantidad de materia orgánica del suelo, lo que significa que la agricultura de conservación tiene el potencial de incrementar la capacidad de retención de agua.

2.4. Balance de agua en el suelo

2.4.1. Infiltración y escurrimiento

A pesar de los resultados incongruentes sobre el efecto de la labranza y el manejo de residuos sobre la conductividad hidráulica del suelo, la infiltración es por lo general mayor en cero labranza con retención de residuos en comparación con labranza convencional y en cero labranza con retiro de residuos. Esto probablemente se debe a los efectos directos e indirectos de la cubierta de residuos sobre la infiltración del agua:

- Se ha identificado al rompimiento de macroagregados del suelo como el principal factor que lleva a la obstrucción de los poros superficiales por partículas primarias y microagregados, por lo tanto, la formación de sellos o costras en la superficie. La presencia de residuos del cultivo sobre el suelo previene la desagregación por el impacto directo de las gotas de lluvia así como por el rápido secado de los suelos.
- Asimismo, los agregados son más estables en cero labranza con retención de residuos en comparación con labranza convencional y cero labranza con retiro de residuos. Esto significa que hay menos desagregación inducida por humedecer rápidamente los agregados o por la fuerza del viento, lo que previene la formación de encostramiento en la superficie.
- Los residuos dejados sobre la superficie actúan como una sucesión de barreras, reduciendo la velocidad del escurrimiento y dejando que el agua tenga más tiempo para infiltrarse. Los residuos interceptan la lluvia y la liberan más lentamente.

McGarry *et al.* (2000) observaron que el tiempo de saturación, la tasa de infiltración final y la infiltración total eran significativamente mayores con cero labranza con retención de residuos que con la labranza convencional (figura 5). Esto se atribuyó a la abundancia de poros en el suelo aparentemente continuos desde la superficie del suelo a la profundidad en cero labranza, a diferencia de un encostramiento superficial de alta densidad en la labranza convencional.

2.4.2. Evaporación

La evaporación del suelo está determinada por dos factores: qué tan húmedo está el suelo y qué tanta energía recibe la superficie del suelo para sostener el proceso. La labranza mueve suelo húmedo a la superficie, incrementando las pérdidas por la evaporación. Por lo tanto, la perturbación de la labranza en la superficie del suelo incrementa la evaporación

del agua en comparación con las áreas de cero labranza. La cantidad de energía que la superficie del suelo recibe está influenciada por el follaje y la cobertura de residuos. La cobertura de residuos reduce la evaporación del agua del suelo al disminuir su temperatura, impedir la difusión del vapor, absorber el vapor del agua en el tejido de los residuos y reducir el gradiente de la velocidad del viento en la interfaz entre suelo y atmósfera. La tasa de secado del suelo es determinada por el espesor de los residuos junto con el potencial de evaporación atmosférica.

Las características de los residuos que afectan los componentes del balance de energía (por ejemplo, albedo e índice de superficie cubierta con residuos) y que tienen un gran impacto sobre los flujos de evaporación varían a lo largo del año y espacialmente a través del campo debido a la distribución no uniforme de los residuos.

2.4.3. Contenido de humedad del suelo y agua disponible para la planta

La agricultura de conservación puede incrementar la infiltración, reducir el escurrimiento y la evaporación en comparación con la labranza convencional y cero labranza con retiro de residuos. Por consiguiente, se conserva la humedad del suelo y hay más agua disponible para los cultivos. El mantillo ayuda a conservar la humedad del suelo en una temporada con largos periodos sin lluvia. El contenido de humedad del suelo se incrementa con el aumento de la cobertura superficial. Un mayor contenido de humedad del suelo permite a los cultivos crecer durante periodos cortos de sequía. Por lo tanto, cero labranza con retención de residuos disminuye la frecuencia e intensidad de las sequías cortas durante la temporada. Por lo tanto, la labranza y el manejo de residuos pueden afectar de manera significativa los rendimientos de los cultivos en áreas o temporadas con mala distribución de las lluvias.

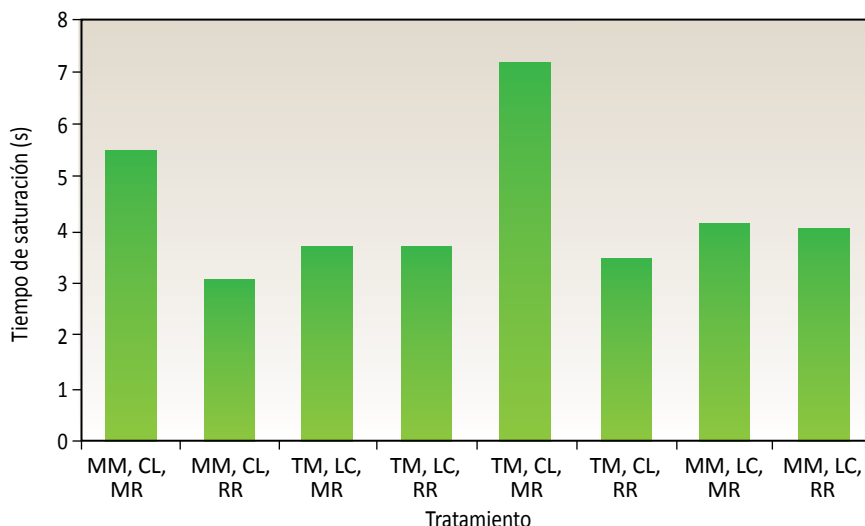


Figure 5. Efecto de labranza, rotación de cultivos y manejo de residuos sobre el tiempo de saturación durante el ciclo del cultivo de maíz en el año 2004 en el ensayo a largo plazo del CIMMYT, El Batán, México.

T = trigo; M = maíz; MR = se mantienen los residuos en el campo; RR = se retiran los residuos; LC = labranza convencional; CL = cero labranza. (adaptado de Govaerts *et al.*, 2009).

2.5. Erosión del suelo

2.5.1. Erosión hídrica

Las tasas de erosión en los campos agrícolas cultivados con labranza convencional promedian 1-2 órdenes de magnitud más que la erosión en áreas con vegetación nativa y la erosión geológica a largo plazo excede la producción de suelo. La erosión del suelo está en función de la erosividad y erosionabilidad. La erosividad está relacionada con las características físicas de la precipitación en la superficie del suelo y la velocidad del escurrimiento. Por lo tanto, la erosividad es afectada por los residuos del cultivo (por ejemplo, en suelos con cero labranza con retención de residuos) que rompen el impacto de las gotas de lluvia y retardan el escurrimiento, lo que reduce la erosión. La erosionabilidad del suelo está relacionada con las características físicas del suelo. La desagregación es un buen indicador de la erosionabilidad del suelo, ya que el rompimiento a partículas más finas, más transportables y microagregados incrementa el riesgo de erosión. Las prácticas de agricultura de conservación tienen una mayor estabilidad de agregados en comparación con las prácticas convencionales o los campos con cero labranza sin retención de residuos. Esto da como resultado un menor potencial de erosión del suelo para la agricultura de conservación. El efecto positivo de la agricultura de conservación sobre la erosionabilidad reducida se ve aumentado adicionalmente por la disminución en la cantidad de escurrimiento.

En resumen, la agricultura de conservación tiene tasas de erosión mucho más cercanas a las tasas de producción del suelo que la labranza convencional, por lo tanto, puede proporcionar las bases para una agricultura sustentable.

2.5.2. Erosión eólica

La susceptibilidad de los suelos a la erosión eólica depende en gran medida de la distribución del tamaño de los agregados y se determina mediante tamizado en seco. El porcentaje de agregados con tamaños menores de 0.84 mm es considerado como la fracción del suelo susceptible de ser transportada por el viento. Esta fracción erosionable es del doble en peso en la labranza convencional que en cero labranza, lo que indica que la labranza convencional es mucho más susceptible a la erosión eólica (Singh y Malhi, 2006). Asimismo, se ha demostrado que la fracción erosionable se incrementa con el tiempo en la labranza convencional, mientras que la fracción permanece sin cambios en cero labranza. La vegetación y la cobertura de residuos del cultivo también tienen un papel importante en la reducción de la erosión eólica al disminuir la exposición del suelo al viento en la superficie e interceptando el material en saltación. El rastreo en pie es más efectivo para controlar la erosión eólica que el rastreo aplanado.

2.6. Temperatura del suelo

El balance entre la radiación entrante y saliente determina la energía disponible para calentar el suelo. Los residuos retenidos afectan la temperatura del suelo cerca de la superficie debido a que afectan este balance de energía. La energía solar en la superficie del suelo se divide en el flujo de calor del suelo, reflexión del calor sensible y calor latente para la evaporación del agua. Los residuos en la superficie reflejan la radiación solar y aíslan la superficie del suelo. Debido a que las partículas del suelo tienen una menor capacidad calórica y una mayor conductividad calórica que el agua, los suelos secos potencialmente se calientan y enfrían más rápido que los suelos húmedos. Además, en los suelos húmedos se usa más energía para la evaporación del agua que para calentar el suelo. Las operaciones de labranza incrementan las tasas de secar y humedecer el suelo debido a que la labranza perturba la superficie del suelo e incrementa las bolsas de aire en las cuales se presenta la evaporación. Las temperaturas del suelo en las capas superficiales pueden ser significativamente menores (por lo general entre 2 °C y 8 °C) durante el día (en verano) en suelos con cero labranza con retención de residuos en comparación con la labranza convencional. Durante la noche, el efecto de aislamiento de los residuos lleva a mayores temperaturas de manera que hay una menor diferencia en las temperaturas del suelo en 24 horas en comparación con cero labranza. En los suelos calientes tropicales, la cobertura de residuos reduce las temperaturas máximas del suelo que son muy altas para el crecimiento y desarrollo óptimo a un nivel apropiado, favoreciendo la actividad biológica, el crecimiento del cultivo inicial y el desarrollo de raíces durante la temporada de crecimiento.

Sin embargo, en áreas templadas, las menores temperaturas crean suelos fríos desfavorables, retardando el crecimiento inicial del cultivo y produciendo un menor rendimiento especialmente si se presentan heladas tardías. En áreas templadas, se sugiere usar una franja sin residuos suelo sobre el centro de la hilera. Esta franja puede proporcionar más entrada de calor a la superficie del suelo en el centro de la hilera y no tiene efectos adversos sobre el contenido de humedad del suelo.

3. Influencia de la agricultura de conservación sobre la calidad química del suelo

3.1. Carbono orgánico del suelo

Se ha propuesto al carbono orgánico del suelo (COS) como un indicador primario de la calidad del suelo, en especial la concentración de COS superficial. El suelo superficial

es el horizonte vital que recibe las semillas, fertilizantes y plaguicidas aplicados en las tierras de cultivo. También es la capa que es afectada por el intenso impacto de la precipitación pluvial y divide los flujos de gases hacia dentro y fuera del suelo. La materia orgánica superficial es esencial para el control de la erosión, la infiltración del agua y la conservación de los nutrientes.

3.1.1. Contenido total de carbono orgánico del suelo

Cuando se comparan los COS en diferentes prácticas de manejo, se deben tener en cuenta varios factores:

1. La densidad aparente se puede incrementar después de la conversión de suelos con labranza convencional a cero labranza. Si se toman muestras a la misma profundidad dentro de la capa de suelo superficial, se tomará más masa edáfica del suelo con cero labranza que del suelo con labranza convencional. Esto podría incrementar la masa aparente del COS en el cero labranza.
2. Las prácticas de labranza también pueden influir en la distribución del COS en el perfil, con mayor contenido de COS en las capas superficiales de suelos con cero labranza que con labranza convencional, pero con mayor contenido de COS en las capas más profundas de las parcelas con labranza donde los residuos se incorporan.

Debido a estas razones, se puede sobrestimar el contenido de COS en los sistemas de cero labranza en comparación con labranza convencional si no se considera toda la profundidad del arado.

3.1.1.1. Influencia de la práctica de labranza sobre el carbono orgánico del suelo

No es clara la influencia de los diversos componentes que comprenden la agricultura de conservación (labranza reducida, retención de residuos del cultivo y rotación de cultivos) sobre el COS. Sin embargo, se pueden distinguir algunos factores que tienen un papel importante:

- Diferencias en el desarrollo de las raíces y rizodepósitos: El carbono derivado de las raíces del cultivo puede ser muy importante.
- Densidad aparente del suelo y porosidad: El uso de cero labranza solo aumenta la protección física del COS donde la densidad aparente del suelo es relativamente alta y cuando el manejo de cero labranza reduce el volumen de macroporos pequeños.
- Clima: Los impactos del manejo son sensibles al clima en el siguiente orden de los cambios en el COS más grandes a los menores: trópico húmedo > trópico seco > templado húmedo > templado seco.

- La estabilización del carbono en los microagregados dentro de los macroagregados: El carbono orgánico atrapado dentro de los microagregados del suelo contribuye al almacenamiento de carbono a largo plazo en suelos agrícolas. Estos microagregados dentro de los macroagregados constituyen hábitats relativamente estables y aislados para los microorganismos.

3.1.1.2. Influencia de la retención de residuos sobre el carbono orgánico del suelo

Los residuos del cultivo son precursores de depósitos de COS y el mayor retorno de residuos del cultivo al suelo está asociado con un incremento en la concentración de COS. La tasa de descomposición de los residuos del cultivo depende no solo de la cantidad retenida, sino de las características del suelo y la composición de los residuos. La composición de los residuos dejados sobre el campo —la fracción soluble, el contenido de lignina, hemicelulosa (celulosa) y polifenol— determinarán su descomposición.

3.1.1.3. Influencia de la rotación de cultivos sobre el carbono orgánico del suelo

La alteración de la rotación de cultivos puede influir en el COS al cambiar la cantidad y la calidad del aporte de materia orgánica. Un aumento en la conservación de la humedad relacionada con prácticas de agricultura de conservación puede dar como resultado la posibilidad de crecer un cultivo de cobertura adicional justo después de cosechar el cultivo principal. Los cultivos de cobertura llevan a mayores contenidos de COS al incrementar el aporte de residuos vegetales y proporcionar una cubierta vegetal durante periodos críticos. Sin embargo, el incremento en la concentración de COS puede ser anulado cuando los residuos del cultivo se incorporan en el suelo.

La agricultura de conservación puede incrementar la posibilidad para la intensificación del sistema de producción debido a un periodo de tiempo de espera más corto entre la cosecha y siembra (debido a que el campo escasamente necesita alguna preparación). Además, otras opciones de cultivo pudieran estar disponibles ya que el periodo de crecimiento real se puede incrementar con la reducción del tiempo de espera y el mejoramiento en el balance de agua en el suelo. En algunas situaciones, pudiera ser posible incluir un cultivo adicional en el sistema después del cultivo principal, o mediante cultivos intercalados o relevo de cultivos con el cultivo principal.

En general, se ha observado que el incremento en la complejidad de la rotación (es decir, cambiar de monocultivo a rotación continua de cultivos, cambiar de cultivo-barbecho a monocultivo continuo o cultivos en rotación, o

incrementar el número de cultivos en un sistema de rotación) da como resultado un incremento en el COS. Sin embargo, este incremento en el COS fue en promedio menor que el incremento observado cuando se cambió de convencional a cero labranza. La rotación de cultivos siguió siendo más eficaz para retener el carbono y el nitrógeno en el suelo que lo que se obtuvo con el sistema con monocultivo.

El efecto de la rotación de cultivos sobre los contenidos de COS puede deberse al aporte de biomasa, debido a la mayor producción total o debido al cambio en la calidad del aporte de residuos. El mecanismo de la captura del carbono en formas estables y a largo plazo podría ser diferente para las diferentes especies de cultivos. Por ejemplo, las rotaciones que incluyen leguminosas contienen un mayor contenido de carbonos aromáticos (una forma de carbono biológicamente muy resistente) por debajo de la capa arable que los cultivos continuos de maíz (Gregorich *et al.*, 2001).

3.1.1.4. Agricultura de conservación: El efecto combinado de la labranza mínima, retención de residuos y rotación de cultivos sobre el carbono orgánico del suelo

La agricultura de conservación no es una tecnología con un único componente sino un sistema que incluye el efecto acumulativo de sus tres componentes básicos. El componente de la intensificación del cultivo dará como resultado un efecto agregado sobre el COS en los sistemas de cero labranza. Para obtener una acumulación de la materia orgánica del suelo (MOS) debe haber no solo un aporte de carbono de los residuos del cultivo sino un aporte externo neto de nitrógeno, por ejemplo, un cultivo de abono verde que fije el nitrógeno. Si se incluye un cultivo de abono verde con leguminosas (veza) en el sistema de producción, la contribución de fijación de N₂ de la veza es el principal factor responsable de la acumulación de carbono observada en el suelo con cero labranza. La mayoría del carbono acumulado derivó de las raíces del cultivo. La labranza convencional puede reducir el efecto de un abono verde que fije nitrógeno debido ya sea a que el aporte de nitrógeno puede reducirse por la liberación de nitrógeno mineral del suelo o el nitrógeno se puede perder por lixiviación o en forma de gases debido a la mineralización de la MOS estimulada por la labranza.

3.1.2. Fraccionamiento del carbono orgánico del suelo

Se pueden distinguir las siguientes fracciones de carbono del suelo:

- La fracción que se puede descomponer más fácilmente, la que se encuentra en una etapa temprana del proceso de humificación.
- Material estabilizado por mecanismos fisicoquímicos (intermedios).
- La fracción bioquímicamente recalcitrante (estable).

Las diferentes fracciones del carbono tienen diferente disponibilidad y tiempos de permanencia en el suelo. El COS de la reserva inestable, la cual consiste principalmente de materia orgánica en partículas (MOP) y algún carbono orgánico disuelto, está más disponible y por consiguiente se descompone más rápidamente, mientras que la fracción del COS resistente es vieja, en contacto con las superficies minerales y proporciona un acceso limitado a los microorganismos. La fracción inestable tiene un papel importante en la formación de agregados y responde rápidamente a los cambios en el manejo del suelo debido a su corto tiempo de permanencia. Por lo tanto, puede ser un buen indicador de los cambios iniciales en el COS. La fracción inestable se incrementa cuando se reduce la intensidad de la labranza. Este incremento explica la mayor concentración de COS observada (0-10 cm) para cero labranza en comparación con labranza convencional (Six *et al.*, 2001).

La rotación de cultivos puede influir en las diferentes fracciones de carbono. Una rotación de cultivos más diversa lleva a una mayor proporción de MOP fina que el monocultivo. El efecto del sistema de labranza sobre la fracción de carbono es menor que el efecto de la intensidad del sistema de producción.

3.2 Disponibilidad de los nutrientes

La labranza, el manejo de residuos y la rotación de cultivos tienen un impacto significativo sobre la distribución de los nutrientes y su transformación en los suelos, por lo general relacionadas con los efectos de la agricultura de conservación sobre el contenido de COS (véase el apartado 3.1 Carbono orgánico del suelo). De manera similar a los hallazgos con el COS, la distribución de los nutrientes en un suelo con cero labranza es diferente a la de un suelo con labranza. Por lo general, se observa un aumento en la estratificación de los nutrientes, un aumento en la conservación y disponibilidad de los nutrientes cerca de la superficie del suelo con cero labranza en comparación con la labranza convencional. La alteración en la disponibilidad de nutrientes en cero labranza puede deberse a la colocación en la superficie de los residuos del cultivo en comparación con la incorporación de los residuos del cultivo con labranza. Una descomposición más lenta de los residuos colocados sobre la superficie puede prevenir la rápida lixiviación de nutrientes a través del perfil del suelo. Con cero labranza, el número de poros continuos puede ser alto, llevando los nutrientes solubles a un paso más rápido hasta más profundo en el perfil del suelo. La densidad de las raíces del cultivo es por lo general mayor cerca de la superficie del suelo en cero labranza en comparación con labranza convencional. Esto lleva a una mayor proporción de nutrientes absorbidos cerca de la superficie del suelo. Sin embargo, las concentraciones de nutrientes en los tejidos vegetales generalmente no se ven afectadas por la labranza o combinaciones de cultivos.

3.2.1. Disponibilidad del nitrógeno

La presencia de nitrógeno mineral en el suelo disponible para la absorción por la planta depende de la tasa de mineralización del carbono. El impacto de la labranza reducida con retención de residuos sobre la mineralización del nitrógeno no es claro. El suelo con cero labranza con retención de residuos puede estar asociado con una menor disponibilidad del nitrógeno debido a una mayor inmovilización producida por los residuos dejados sobre la superficie del suelo. La fase de inmovilización neta cuando se adopta cero labranza puede ser transitoria, ya que la mayor inmovilización del nitrógeno reduce la oportunidad de que se presenten pérdidas por lixiviación y desnitrificación del nitrógeno mineral.

3.2.1.1. Contenido total de nitrógeno

Los efectos de la agricultura de conservación sobre el contenido total de nitrógeno por lo general reproducen a aquellos observados para el COS total ya que el ciclo del nitrógeno está ligado al ciclo del carbono. El suelo con cero labranza y camas permanentes tiene una concentración significativamente mayor de nitrógeno total que la labranza convencional (Govaerts *et al.*, 2007a). Se han observado incrementos significativos en el nitrógeno total con un aumento en las adiciones de residuos del cultivo.

3.2.1.2. La influencia de la práctica de labranza sobre la mineralización del nitrógeno

La labranza incrementa la perturbación de los agregados, lo que hace que la materia orgánica sea más accesible a los microorganismos del suelo e incrementa la liberación del nitrógeno mineral de las reservas activas y físicamente protegidas de nitrógeno. Cuando se reduce la labranza hay más macroagregados estables. El carbono y el nitrógeno en los microagregados dentro de los macroagregados están más protegidos. En general, la tasa de mineralización del nitrógeno se incrementa cuando se reduce la labranza. La tasa de mineralización del nitrógeno también se incrementa con el aumento en la tasa de aplicación de fertilizantes nitrogenados inorgánicos. El manejo de los residuos también determina la tasa de mineralización del nitrógeno. En la labranza convencional, los residuos se incorporan en el suelo, mientras que en cero labranza se dejan sobre la superficie del suelo. Los residuos del cultivo incorporados se descomponen 1.5 veces más rápido que los residuos colocados sobre la superficie. Sin embargo, el tipo de residuos y las interacciones con las prácticas de manejo del nitrógeno también determinan la mineralización del carbono y del nitrógeno.

3.2.1.3. La influencia de los residuos del cultivo sobre la mineralización del nitrógeno

La composición de los residuos dejados sobre el campo afectará su descomposición. La proporción de C/N es uno de los criterios más comúnmente usados para evaluar la calidad, junto con las concentraciones iniciales en los residuos de nitrógeno, lignina, polifenoles y carbono soluble. Durante la descomposición de la materia orgánica, el nitrógeno inorgánico puede ser inmovilizado, especialmente cuando se agrega materia orgánica con una gran proporción C/N al suelo.

Los residuos del cultivo tienen un contenido muy bajo de nitrógeno (aprox. 1 %) y fósforo (aprox. 0.1 %). Dados los contenidos de lignina y polifenol de los residuos del cultivo, estos residuos tienen un papel más importante en su contribución con la acumulación de MOS que como fuentes de nutrientes inorgánicos para el crecimiento de la planta.

3.2.2. Fósforo

Varios estudios han registrado mayores concentraciones de fósforo extraíble en suelos con cero labranza que en suelos con labranza. Esto se debe en gran medida al mezclado reducido del fósforo del fertilizante con el suelo, lo que lleva a una menor fijación del fósforo. Esto es un beneficio cuando el fósforo es un nutriente limitante, pero puede ser una amenaza cuando el fósforo es un problema ambiental debido a la posibilidad de pérdidas de fósforo soluble en el agua de escurrimiento. Generalmente se observa la acumulación de fósforo en la superficie de suelos con cero labranza. Si el suelo superficial se seca con frecuencia durante la temporada de crecimiento, la colocación más profunda de fósforo en cero labranza puede ser una opción. Sin embargo, si hay mantillo sobre la superficie del suelo con cero labranza, es probable que el suelo superficial sea más húmedo que los suelos cultivados con labranza y probablemente no haya necesidad de una colocación más profunda del fósforo.

3.2.3. Contenido de potasio, calcio y magnesio

El suelo con cero labranza conserva e incrementa la disponibilidad de nutrientes, tales como el potasio, cerca de la superficie del suelo donde proliferan las raíces del cultivo. Se observan mayores concentraciones de potasio extraíble en la superficie del suelo cuando disminuye la intensidad de la labranza. El aumento en la cantidad de residuos retenidos también puede llevar a un aumento en la concentración de potasio en la parte superficial del suelo, aunque este efecto es dependiente del cultivo.

Muchas investigaciones han mostrado que la labranza no afecta las concentraciones de calcio y magnesio extraíbles, especialmente donde la capacidad de intercambio catiónico

(CIC) está asociada principalmente con partículas de arcilla. Asimismo, la estratificación vertical del calcio y del magnesio no parece ser afectada por la labranza y el cultivo, pero los resultados no son concluyentes.

3.2.4. Capacidad de intercambio catiónico

El alto contenido de materia orgánica en la superficie del suelo, normalmente observada con agricultura de conservación (véase el apartado 3.1.1 Contenido total de carbono orgánico del suelo), puede incrementar la CIC de la capa superficial del suelo. Sin embargo, las prácticas de labranza y el cultivo no parecen tener un efecto sobre la CIC. La retención de residuos del cultivo, sin embargo, puede incrementar de manera significativa la CIC en la capa de 0-5 cm en comparación con el suelo en el cual se retiraron los residuos.

3.2.5. Cationes micronutrientes y aluminio

El aumento en el suministro de micronutrientes esenciales a cultivos alimenticios puede producir incrementos significativos en las concentraciones en productos vegetales comestibles, contribuyendo con la salud del consumidor. Los cationes de micronutrientes (Zn, Fe, Cu, y Mn) tienden a estar presentes en mayores concentraciones en suelos con cero labranza con retención de residuos en comparación con la labranza convencional. Sin embargo, los informes no son concluyentes acerca de esto. La toxicidad del aluminio parece ser menor en cero labranza con retención de residuos, probablemente debido a la formación de complejos de aluminio con compuestos orgánicos cuando hay agua disponible en la capa superficial del suelo.

3.3. Acidez

La mayoría de los estudios encontraron que el pH de la parte superficial del suelo fue menor (más ácido) para cero labranza que para labranza convencional. Hay algunas hipótesis para esta acidificación:

- La mayor acumulación de MOS en la capa superficial del suelo con cero labranza genera acidez por medio de la descomposición.
- El menor pH de la capa superficial del suelo puede deberse al efecto acidificante de los fertilizantes con nitrógeno y fósforo aplicados de manera más superficial en cero labranza que con labranza convencional.

Sin embargo, se han presentado algunos resultados contrarios, en los cuales se encontró un pH significativamente mayor en la capa superficial del suelo de camas permanentes con

retención completa de residuos en comparación con camas convencionales con retención de residuos.

3.4. Salinidad/sodicidad

Respecto a la pregunta de si las prácticas de labranza influyen en la salinidad del suelo, se han observado resultados contradictorios. En los Valles Altos de México, se ha observado que las camas permanentes son una tecnología que reduce la sodicidad del suelo en condiciones de temporal. Además, la concentración de sodio se incrementó con la reducción en la cantidad de residuos retenidos sobre las camas permanentes (Govaerts *et al.*, 2007a). Esto puede ser importante para zonas salinas. A diferencia, otra investigación sugirió que la labranza tiende a reducir el potencial de la acumulación de sal en la zona de las raíces.

4. Influencia de la agricultura de conservación sobre la calidad biológica del suelo

Los cambios en la labranza, residuos y prácticas de rotación inducen grandes cambios en el número y composición de la fauna y flora del suelo, incluidas tanto plagas como organismos benéficos. Los organismos del suelo responden a los cambios inducidos por la labranza en el ambiente fisicoquímico del suelo y estos, a su vez, tienen un impacto sobre las condiciones fisicoquímicas del suelo, es decir, la estructura del suelo, el ciclo de los nutrientes y la descomposición de la materia orgánica. Las interacciones entre los diferentes organismos pueden tener efectos ya sea benéficos o dañinos sobre los cultivos.

La microflora incluye bacterias, hongos y algas verdes. A los restantes grupos de interés se les denomina fauna del suelo. La fauna del suelo está dividida en tres grupos, con base en su tamaño y su adaptación para vivir ya sea en espacios de poros llenos de agua o espacios de poros llenos de aire del suelo y la hojarasca (cuadro 2).

4.1. Microfauna y microflora del suelo

El mantenimiento de la biomasa microbiana del suelo (BMS), la actividad y diversidad de la microflora es fundamental para el manejo agrícola sustentable. El manejo del suelo influye en los microorganismos y en los procesos microbianos por medio de cambios en la cantidad y calidad de los residuos vegetales

Cuadro 2. Fauna del suelo agrupada de acuerdo con el tamaño y el hábitat

Nombre	Ancho del cuerpo	Hábitat	Ejemplos
Microfauna	< 0.2 mm	Espacios de poros llenos con agua	Protozoarios + nemátodos
Mesofauna	0.2-2 mm	Espacios de poros en suelo y hojarasca llenos con aire	Microartrópodos, colémbolos, oligoquetos pequeños
Macrofauna	≤ 2 mm	Entre agregados del suelo	Termitas, lombrices de tierra, artrópodos grandes

que entran al suelo, su distribución estacional y espacial, la proporción entre los aportes arriba y debajo del suelo, y los cambios en los aportes de nutrientes.

4.1.1. Biomasa microbiana

La BMS refleja la capacidad del suelo para almacenar e incorporar nutrientes (C, N, P y S), materia orgánica y tiene una tasa de cambio alta en comparación con la materia orgánica total del suelo. Tiene algunas características interesantes:

- La BMS responde a cambios en el manejo del suelo por lo general antes de que se conozcan los efectos en términos de carbono y nitrógeno orgánicos.
- La BMS tiene un importante papel en la estabilización física de los agregados.
- La supresión general de enfermedades transmitidas a través del suelo también está relacionada con la BMS total, la cual compite con los patógenos por recursos o causa su inhibición por medio de formas más directas de antagonismo.

Por lo general, se considera que la tasa de aporte de carbono orgánico de la biomasa vegetal es el factor dominante que controla la cantidad de BMS en el suelo. Un suministro uniforme y continuo de carbono de los residuos del cultivo sirve como una fuente de energía para los microorganismos. La retención de residuos puede llevar a cantidades significativamente mayores de BMS, carbono y nitrógeno en la capa superficial del suelo en comparación con el retiro de residuos.

El manejo de residuos tiene más influencia sobre la BMS que el sistema de labranza. Los cambios significativos están confinados en su gran mayoría a la capa superficial del suelo. La influencia de la práctica de labranza sobre el carbono y el nitrógeno en la BMS, también está confinada en su mayoría a las capas superficiales, a menores profundidades (5-10 cm y 10-15 cm), el carbono y el nitrógeno en la BMS generalmente no son significativamente diferentes (Govaerts *et al.*, 2007b).

Los efectos favorables de cero labranza y la retención de residuos sobre las poblaciones microbianas del suelo se deben principalmente a un aumento en la aireación del suelo, condiciones más frías y húmedas, menor temperatura y fluctuaciones en la humedad y un mayor contenido de carbono en el suelo superficial.

Los efectos de varias rotaciones son claros cuando se considera el largo del periodo de barbecho. La reducción del barbecho incrementa la BMS, el carbono y el nitrógeno. Cada operación de labranza incrementa la descomposición de la materia orgánica con una subsiguiente disminución en la MOS.

4.1.2. Diversidad funcional

La diversidad y redundancia funcionales, las cuales se refieren a una reserva de organismos inactivos o una comunidad con vastas superposiciones interespecíficas y plasticidad de los rasgos, son signos de un aumento en la salud del suelo y permiten que un ecosistema mantenga una función del suelo estable. No es posible determinar la diversidad funcional de las comunidades microbianas con base en la estructura de la comunidad, en gran parte debido a que los microorganismos están presentes en el suelo frecuentemente en etapas de reposo o dormancia. Estos microorganismos en dormancia pasan inadvertidos en la mayoría de las mediciones. La medición directa de la diversidad funcional de las comunidades microbianas del suelo probablemente proporcione información adicional sobre el funcionamiento de los suelos.

La diversidad funcional es mayor con cero labranza con retención de residuos que con la labranza convencional. Cuanto más se mantengan los residuos, las diferencias en el perfil fisiológico a nivel de comunidad de la BMS son mínimas entre cero labranza y la labranza convencional. Cuando se retiran los residuos, la diversidad funcional disminuye en cero labranza (Govaerts *et al.*, 2007b). Las raíces tienen un importante papel en dar forma a las comunidades microbianas del suelo al liberar una amplia variedad de compuestos que pueden diferir entre las plantas. Se sabe que esta variación selecciona comunidades bacterianas divergentes. Esto indica la importancia de la rotación de cultivos para la salud del suelo.

4.1.3. Actividad enzimática

Las enzimas de suelo tienen un papel esencial en la canalización de reacciones necesarias para la descomposición de la materia orgánica y ciclo de los nutrientes. Estas están involucradas en la transferencia de energía, la calidad ambiental y la productividad del cultivo. Las prácticas de manejo tales como la labranza, la rotación de cultivos y el manejo de residuos pueden tener diversos efectos sobre diferentes enzimas del suelo. La actividad enzimática por lo general disminuye con la profundidad del suelo. Por lo tanto, la diferenciación entre las prácticas de manejo es mayor en el suelo superficial. La rotación de cultivos y el manejo de residuos también pueden afectar la actividad enzimática en el suelo. La reducción del barbecho parece aumentar la actividad enzimática del ciclo del carbono y del fósforo.

4.1.4. Estructura de la comunidad microbiana

Los actinomicetos, otras bacterias, hongos, protozoarios y algas son las poblaciones más abundantes y metabólicamente activas en el suelo.

4.1.4.1. Hongos y bacterias

Los hongos son alimento para los nemátodos, ácaros y otros organismos más grandes del suelo; pero también pueden atacar a otros organismos del suelo. Los hongos filamentosos son responsables de la descomposición de la materia orgánica y participan en el ciclo de los nutrientes. De particular interés para los sistemas de manejo agrícolas son los hongos micorrizógenos arbusculares, los cuales son simbiosis ubicuos de la mayoría de las plantas superiores, incluidos la mayoría de los cultivos. El micelio externo de los hongos micorrizógenos arbusculares actúa como una extensión de las raíces de la planta hospedera y absorbe nutrientes del suelo, especialmente aquellos con baja movilidad tales como el fósforo, cobre y zinc. Las micorrizas arbusculares interactúan con patógenos y otros habitantes de la rizosfera que afectan la salud y nutrición vegetal.

Con frecuencia se dice que, en la escala de microcadena trófica, los sistemas de cero labranza tienden a ser dominados por hongos mientras que en sistemas de labranza convencional tienden a ser dominados por bacterias. Sin embargo, esto puede depender si las mediciones son realizadas cerca de la superficie del suelo o más profundo en el perfil del suelo, ya que los residuos del cultivo en la superficie del suelo con cero labranza tienden a ser dominados por hongos. La perturbación de la red de hifas de hongos micorrizógenos, una importante fuente de inóculo cuando las raíces envejecen, es un posible mecanismo por medio del cual la labranza convencional reduce la colonización de las raíces por las micorrizas arbusculares. La labranza también transporta hifas y fragmentos de raíz colonizados a la capa superior del suelo, lo que reduce la posibilidad de que sean benéficas para el próximo cultivo.

Cuando se retienen los residuos del cultivo, sirven como una fuente de energía continua para los microorganismos. La retención de los residuos del cultivo sobre la superficie incrementa la abundancia de microorganismos debido a que los microorganismos encuentran mejores condiciones para su reproducción en la capa superficial del suelo. La reducción de la labranza también tiene un efecto sobre ciertas bacterias, tales como *Agrobacterium spp.* y *Pseudomonas spp.* Por lo tanto, no es la cero labranza en sí mismo responsable del aumento en la microflora, sino más bien la combinación de cero labranza y la retención de residuos.

4.1.4.2. Nemátodos

Se ha establecido que en suelos con cero labranza, los residuos del cultivo están dominados por hongos. Se encuentra un predominio de nemátodos que se alimentan de hongos en la capa de 0-5 cm en cero labranza. La labranza reducida lleva a una población significativamente mayor de nemátodos que en la labranza convencional. La retención de residuos contribuyó con una alta densidad poblacional de

nemátodos de vida libre (benéficos) mientras que en suelo convencional, independientemente del manejo de residuos, contribuyó a suprimir los nemátodos parásitos de plantas. La población de nemátodos que se alimentan de bacterias fue significativamente mayor en la labranza convencional que en cero labranza con retención de residuos (Yeates y Hughes, 1990). La rotación de cultivos también parece tener un efecto sobre la densidad de la población total de nemátodos de vida libre.

4.1.5. Enfermedades transmitidas por el suelo

La reducción en la labranza afecta a diferentes especies de plagas de varias maneras, dependiendo de sus métodos de supervivencia y ciclos de vida. Las especies que pasan uno o más estadios de su vida en el suelo son afectadas de manera más directa por la labranza. Cuando se combina la labranza reducida con la retención de residuos sobre la superficie del suelo, esto proporciona sustratos para el crecimiento a los patógenos que se transmiten por medio de los residuos y a especies benéficas. Además los patógenos están en la superficie del suelo, donde se puede presentar la liberación de esporas. Muchos patógenos vegetales usan los residuos del cultivo hospedero como base de su alimento y como un 'trampolín' para infectar al próximo cultivo. Esto incluye una diversidad de patógenos fúngicos necrótrofos que atacan hojas, tallos e inflorescencias que sobreviven como estructuras reproductoras y de diseminación de esporas formadas dentro del tejido muerto de sus hospederos. Estas estructuras están, de esta manera, en una posición ideal sobre la superficie del suelo y debajo del follaje del próximo cultivo en los sistemas de cero labranza.

Los patógenos más comunes causantes de la pudrición de raíces en los sistemas de cultivo de cereales con cero labranza son:

- Mal del pie, causado por *Gaeumannomyces graminis* (Sacc.) Arx y Olivier var. *tritici* I Walter.
- Pudrición de la raíz y falta de germinación por *Rhizoctonia solani* Kühn AG 8.
- Marchitez temprana de las plantúlas y pudrición de las raíces causada por *Pythium aphanidermatum* (Edison) Fitzp y otras especies del mismo género.
- Pudrición de la corona, pie y raíz causada por *Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc., *F. pseudograminearum* O'Donnel y T. Aoki y otras especies del género *Fusarium*.
- Pudrición de la raíz común causado por *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem.

Muchos estudios han examinado el impacto de las enfermedades de pudrición de la raíz en el trigo y la cebada cultivados con labranza, pero pocos se han centrado en los efectos de la agricultura de conservación, y aquellos que lo han hecho han llegado a conclusiones contradictorias. Los

residuos sobre la superficie del suelo dan como resultado un suelo superficial más frío y húmedo. Estas condiciones pueden ser benéficas para las infecciones de las raíces causadas por el mal del pie, pudrición de la raíz por *Pythium* y pudrición de la raíz por *Rhizoctonia*. Sin embargo, no siempre se observa un incremento en la prevalencia de la pudrición de la raíz con cero labranza.

Los residuos de plantas infectadas dejados sin alterar en el suelo pueden representar un mayor riesgo de infección en el próximo cultivo que si este tejido fuera desmenuzado por medio de la labranza. Por otra parte, la labranza del suelo también distribuirá los residuos del cultivo infectados más uniformemente de manera que un número mayor de raíces del próximo cultivo estará expuesto a la infección.

Debido a que el *Fusarium* causante de las pudriciones del pie y las raíces sobrevive en la paja, pudiera ser posible que la enfermedad fuera más grave en campos con siembra directa que en campos con siembra convencional. Se ha observado un incremento en la incidencia de pudrición de la raíz por *Fusarium* en algunos casos, pero no se ha encontrado una relación directa entre el incremento en la pudrición de la raíz y el rendimiento.

La rotación de cultivos puede reducir la contaminación con patógenos en los residuos del cultivo en el suelo. En el monocultivo, la población de microorganismos en el suelo se puede acumular durante muchos años, lo que lleva a una reducción en el rendimiento. Un ciclo de rotación de 2 años, que incluya una suspensión de 1 año, puede ofrecer un remedio significativo para las presiones de plagas debido a cambios inducidos por la rotación en la composición de la fauna y flora del suelo. Sin embargo, la rotación de cultivos debe ser económicamente viable para que pueda ser adoptada por los agricultores. Para algunas enfermedades, como las causadas por *Pythium* y *Rhizoctonia*, que tienen un amplio rango de hospederos, el uso de rotación de cultivos para manejar las pudriciones de la raíz debe incluir un periodo sin plantas para ser efectivo. Esto puede significar un gasto, pero no un ingreso, de esa parcela, dependiendo de la duración del barbecho. Las plagas también pueden adaptarse a la rotación de cultivos.

La labranza reducida en combinación con la retención de residuos define de manera indirecta la composición de especies de la comunidad microbiana del suelo al mejorar la retención de humedad del suelo y modificar su temperatura. Los cambios en el contenido de materia orgánica con cero labranza y retención de residuos también pueden favorecer el crecimiento de muchos otros microorganismos en la capa superficial del suelo (0-10 cm). Por lo tanto, cero labranza en combinación con la retención de residuos del cultivo puede crear un ambiente que es más antagónico para los patógenos debido a la competencia y efectos de la antibiosis.

Diversas especies de hongos y bacterias tienen un papel en el control biológico de los patógenos de las raíces y, en general, el mantenimiento de la salud del suelo:

- Cepas fluorescentes de *Pseudomonas* pueden suprimir patógenos vegetales que se transmiten por el suelo por medio de diversos mecanismos.
- Muchas especies de *Actinomycetes* que se transmiten por el suelo producen metabolitos bioactivos que se pueden usar como antibióticos.
- Algunas especies de *Fusarium* son agentes de control biológico activos.

En un estudio realizado por Govaerts *et al.* (2006), el suelo con cero labranza con rotación y retención de residuos mejoró la disponibilidad del agua, la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes más que la labranza convencional y, en consecuencia, derivó en mejores rendimientos. La cero labranza y los residuos del cultivo incrementaron la diversidad de la vida microbiana. Las enfermedades de las raíces pueden haber afectado el desempeño del cultivo pero el impacto fue menor que otros factores de crecimiento críticos tales como disponibilidad del agua o estado de micro y macronutrientes. A largo plazo, la cero labranza con retención de residuos crea condiciones favorable para el desarrollo de antagonistas y depredadores, y fomenta una nueva estabilidad ecológica (Govaerts *et al.*, 2006). Por lo tanto, existe el potencial para una mayor supresión en general de patógenos en los suelos con siembra directa con retención de residuos del cultivo.

Aparte de la rotación de cultivos estratégica y el aumento en el control biológico en los sistemas de agricultura de conservación, se ha propuesto el uso de fumigación del suelo como una medida de control para situaciones en las que las enfermedades transmitidas a través del suelo pudieran ser un problema. La fumigación es económicamente viable solo para ciertos cultivos de hortalizas de gran valor, tales como las fresas.

El mejoramiento genético ha sido muy efectivo contra patógenos especializados, tales como la roya y el mildiu, debido a la disponibilidad de genes dentro las especies relacionadas para la resistencia a patógenos. Se requiere investigación estratégica que se concentre en las interacciones entre el genotipo y el sistema de manejo agronómico.

Las densidades de nemátodos varían de 2×10^5 individuos m^{-2} en suelo árido a más de 3×10^7 individuos m^{-2} en ecosistemas húmedos. Se pueden esperar pérdidas en el rendimiento debidas a nemátodos con los sistemas convencionales en condiciones sin riego óptimo y semiáridas. Pocos nemátodos parásitos vegetales tiene importancia económica, por ejemplo *Pratylenchus thornei*, el cual puede producir

pérdidas en el rendimiento de hasta 40 %. La presencia de nemátodos parásitos de las plantas no necesariamente significa que el rendimiento del cultivo se vea afectado. Es posible que la población esté por debajo del umbral de daño. No todos los nemátodos reaccionan de la misma forma a la labranza y la retención de residuos. En condiciones de una perturbación mínima del suelo, es posible que las poblaciones de enemigos naturales de los nemátodos parásitos aumenten. Los residuos del cultivo también pueden aumentar la población de bacterias, proporcionando alimento a las especies no parásitas de las plantas. Por lo tanto, su número se incrementará con cero labranza con retención de residuos.

4.2. Meso y macrofauna del suelo

Desde un punto de vista funcional, la macrofauna del suelo se puede dividir en dos grupos:

1. Transformadores de hojarasca (artrópodos grandes y mesofauna del suelo): Efecto menor sobre la estructura del suelo. Fragmentan hojarasca y depositan principalmente excretas orgánicas.
2. Ingenieros del ecosistema (principalmente termitas y lombrices de tierra): Ingieren una mezcla de materia orgánica y suelo mineral, y son responsables de la introducción gradual de materiales orgánicos muertos en el suelo. Tienen una gran influencia sobre la estructura y agregación del suelo.

4.2.1. Mesofauna del suelo

Los microartrópodos del suelo consisten principalmente de colémbolos y ácaros, y forman la mayor parte de la mesofauna del suelo. Los colémbolos son inhibidos generalmente por las perturbaciones de la labranza, aunque algunos estudios han mostrado lo contrario o ningún efecto. Los ácaros presentan un rango más amplio de respuestas, siendo estas más extremas a la labranza que los grupos microbianos, y se han observado incrementos o reducciones de moderadas a extremas. Los diferentes grupos taxonómicos de ácaros parecen responder de manera diferente a la perturbación de la labranza, lo cual explica la variación en las respuestas. El efecto de la labranza sobre las poblaciones de microartrópodos es causado en parte por la perturbación física que produce la labranza sobre el suelo. Algunos individuos pueden morir por abrasión durante las operaciones de labranza o por quedar atrapados en los terrones del suelo después de la inversión de la labranza. Los enquitreidos son otro grupo faunístico importante dentro de la mesofauna. Son lombrices pequeñas incoloras que excavan ampliamente en el suelo y pueden incrementar la aireación, la infiltración del agua y el crecimiento de las raíces, y su presencia puede ser estimulada o inhibida por la labranza.

4.2.2. Macrofauna del suelo

Los organismos grandes parecen ser especialmente sensibles al manejo de agroecosistemas. Las especies con gran movilidad y mayor potencial de crecimiento poblacional se verán menos afectadas. La labranza, por medio de la perturbación física directa así como la destrucción del hábitat, reduce en gran medida las poblaciones tanto de transformadores de hojarasca como de ingenieros del ecosistema. La incorporación de residuos puede limitar los procesos de recolonización por la flora y fauna del suelo debido a la redistribución de la fuente de alimento así como mayores fluctuaciones de agua y temperatura, lo cual reduce su periodo activo en el suelo. Aunque la rotación de cultivos puede en teoría ser benéfica para las poblaciones de macrofauna del suelo mediante un mayor retorno de biomasa al suelo, los datos sobre esto no son concluyentes.

4.2.2.1. Lombrices de tierra

Los efectos positivos de las lombrices de tierra no solo están mediados por la abundancia sino también por la diversidad funcional de sus comunidades. Hay tres clases de lombrices de tierra:

- Epigeas: Viven sobre el suelo y se alimentan en las capas de hojarasca.
- Anécicas: Se alimentan de una mezcla de hojarasca y suelo mineral y crean galerías verticales con aberturas a la superficie.
- Endogeas: Habitan en los horizontes minerales del suelo y se alimentan de suelo más o menos enriquecido con materia orgánica.

Las especies de lombrices de tierra difieren en su comportamiento ecológico y, por lo tanto, tienen diferentes efectos sobre los suelos. La presencia de todos los grupos parece ser esencial para mantener la estructura del suelo. De hecho, se observó que las combinaciones de lombrices de tierra desequilibradas debidas a perturbaciones reducen la infiltración y causan una erosión grave.

En general, se observó que la abundancia, diversidad y actividad de las lombrices de tierra se incrementa con la agricultura de conservación en comparación con la labranza convencional. Aunque la labranza es el principal factor que perturba las poblaciones de lombrices de tierra, los residuos del cultivo convertidos en composta también son importantes ya que las lombrices de tierra no tienen la capacidad de mantener un contenido de humedad del suelo constante (su contenido de humedad está influido en gran medida por el potencial del agua del medio circundante). Los excrementos de las lombrices de tierra promueven la creación de complejos estables de compuestos orgánicos y minerales con tasas de descomposición reducidas que favorecen la estabilidad de macroagregados del suelo si se permite que se seque o

envejecen. Sin embargo, cuando los excrementos frescos son expuestos a la lluvia, se pueden dispersar fácilmente contribuyendo con la erosión del suelo y las pérdidas de nutrientes. Asimismo, se ha registrado que la actividad de las lombrices de tierra está relacionada con un incremento en la infiltración en el suelo con cero labranza mediante un aumento en la rugosidad de la superficie del suelo y en la macroporosidad del suelo, especialmente cuando las poblaciones son importantes.

4.2.2.2. *Termitas y hormigas*

Se ha propuesto que las termitas y hormigas son tan importantes como las lombrices de tierra en la transformación del suelo. Son predominantes en regiones áridas y semiáridas donde las lombrices de tierra por lo general están ausentes o están presentes en cantidades muy bajas. Usualmente, las termitas y las hormigas incrementan la infiltración al mejorar la agregación y la porosidad del suelo. Las termitas que se alimentan del suelo también forman microagregados ya sea al pasar el material del suelo a través de su sistema intestinal y depositándolo como excretas o al mezclar el suelo con saliva usando sus mandíbulas. Las hormigas cambian la calidad del suelo al incrementar la materia orgánica, arena y limo, y reduciendo las concentraciones de arcilla, calcio, magnesio, potasio y sodio, particularmente en áreas cerca o adyacentes a los hormigueros y rutas de alimentación.

Las opciones de manejo que favorecen a las poblaciones de hormigas y termitas, tales como la retención de residuos y cero labranza, han sido identificadas como factores importantes para mejorar la capa superficial del suelo en los agroecosistemas, incluso en condiciones degradadas. Sin embargo, dada la distribución concentrada en ciertas áreas, no es claro si la actividad de las hormigas y termitas tenga efectos importantes en todo el campo. Además, su efecto positivo sobre la estructura del suelo puede ser contrarrestado por un efecto negativo sobre el rendimiento del cultivo y la retención de residuos por medio de su actividad herbívora.

4.2.2.3. *Artrópodos*

No todos los artrópodos son transformadores de hojarasca. Sin embargo, la mayoría de los artrópodos tiene que ver, al menos en parte, en la incorporación de la materia orgánica al excavar y reubicar el alimento, mejorando, de esta manera, la estructura del suelo. En teoría, los artrópodos son favorecidos por las condiciones de la agricultura de conservación dado que la presencia de hojarasca sobre la superficie del suelo constituye una fuente de alimento para muchos artrópodos. La diversidad de todas las especies de artrópodo es por lo general mayor en la agricultura de conservación en comparación con los sistemas

convencionales. Un aspecto interesante, es que se ha observado un aumento en la presencia de depredadores en comparación con las especies fitófagas con los sistemas de cero labranza. Esto tiene importantes implicaciones en el manejo de plagas.

Este artículo está basado en:

Verhulst, N., Govaerts, B., Verachtert, E., Castellanos-Navarrete, A., Mezzalama, M., Wall, P., Deckers, J., Sayre, K.D., 2010. Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems?, in: Lal, R., Stewart, B.A. (Eds.), *Advances in Soil Science: Food Security and Soil Quality*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 137–208.

5. 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).

6. Referencias

- Blanco-Canqui, H., Lal, R., 2007. Impacts of long-term wheat straw management on soil hydraulic properties under no-tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 1166–1173.
- Govaerts, B., Mezzalama, M., Sayre, K.D., Crossa, J., Nicol, J.M., Deckers, J., 2006. Long-term consequences of tillage, residue management, and crop rotation on maize/wheat root rot and nematode populations in subtropical highlands. *Appl. Soil Ecol.* 32, 305–315.
- Govaerts, B., Fuentes, M., Mezzalama, M., Nicol, J.M., Deckers, J., Etchevers, J.D., Figueroa Sandoval, B., Sayre, K.D., 2007a. Infiltration, soil moisture, root rot and nematode populations after 12 years of different tillage, residue and crop rotation managements. *Soil Till. Res.* 94, 209–219.
- Govaerts, B., Mezzalama, M., Unno, Y., Sayre, K.D., Luna-Guido, M., Vanherck, K., Dendooven, L., Deckers, J., 2007b. Influence of tillage, residue management, and crop rotation on soil microbial biomass and catabolic diversity. *Appl. Soil Ecol.* 37, 18–30.
- Govaerts, B., Sayre, K.D., Goudeseune, B., De Corte, P., Lichter, K., Dendooven, L., Deckers, J., 2009. Conservation agriculture as a sustainable option for the central Mexican highlands. *Soil and Tillage Research.* 103, 222–230.
- Gregorich, E.G., Drury, C.F., Baldock, J.A., 2001. Changes in soil carbon under long-term maize in monoculture and legume-based rotation. *Can. J. Soil Sci.* 81, 21–31.
- Horne, D.J., Ross, C.W., Hughes, K.A., 1992. 10 years of a maize oats rotation under 3 tillage systems on a silt loam in New-Zealand .1. A comparison of some soil properties. *Soil Till. Res.* 22, 131–143.

- Li, H.W., Gao, H.W., Wu, H.D., Li, W.Y., Wang, X.Y., He, J., 2007. Effects of 15 years of conservation tillage on soil structure and productivity of wheat cultivation in northern China. *Aust. J. Soil Res.* 45, 344–350.
- Lichter, K., Govaerts, B., Six, J., Sayre, K.D., Deckers, J., Dendooven, L., 2008. Aggregation and C and N contents of soil organic matter fractions in a permanent raised-bed planting system in the highlands of Central Mexico. *Plant Soil.* 305, 237–252.
- McGarry, D., Bridge, B.J., Radford, B.J., 2000. Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics. *Soil Till. Res.* 53, 105–115.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shprez, L., Fitton, L., Saffouri, R., Blair, R., 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science* 267, 1117–1123.
- Singh, B., Malhi, S.S., 2006. Response of soil physical properties to tillage and residue management on two soils in a cool temperate environment. *Soil Till. Res.* 85, 143–153.
- Six, J., Guggenberger, G., Paustian, K., Haumaier, L., Elliott, E.T., Zech, W., 2001. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates. *Eur. J. Soil Sci.* 52, 607–618.
- VandenBygaart, A.J., Protz, R., Tomlin, A.D., 1999. Changes in pore structure in a no-till chronosequence of silt loam soils, southern Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 79, 149–160.
- Verhulst, N., Carrillo-García, A., Moeller, C., Trethowan, R., Sayre, K.D., Govaerts, B., 2011. Conservation agriculture for wheat-based cropping systems under gravity irrigation: increasing resilience through improved soil quality. *Plant Soil* 340, 467–480.
- Yeates, G.W., Hughes, K., 1990. Effect of three tillage regimes on plant and soil nematodes in an oats/maize rotation. *Pedobiologia* 34, 379–387.

