

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE QUÍMICA**

Labranza de conservación y captura de carbono en suelos cebaderos de Hidalgo y Tlaxcala

**TRABAJO DE TESIS
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

LIC. EN QUÍMICA EN ALIMENTOS

**PRESENTA:
ELSA ROQUE ÁLVAREZ**

**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. ROSA ICELA BELTRAN HERNÁNDEZ**



MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO, DICIEMBRE 2010

Contenido

Índice de cuadros	3
Índice de figuras	3
NOTACIONES Y UNIDADES	4
RESUMEN	5
1. MARCO TEÓRICO	6
1.1 Participación del suelo en la producción de gases con efecto invernadero	6
1.2 La labranza del suelo	7
<i>Labranza primaria</i>	7
<i>Labranza secundaria</i>	7
1.2.1 Labranza convencional	8
1.2.2 Labranza de conservación	9
1.2.3 Labranza vertical	9
1.2.4 Labranza mínima	10
1.2.5 Siembra directa	10
1.3 Beneficios que aporta la labranza de conservación	11
<i>Beneficios para los productores</i>	11
<i>Beneficios para el suelo</i>	11
<i>Beneficios para el medio ambiente</i>	13
1.4 La labranza de conservación en las zonas semiáridas	13
<i>Importancia de las zonas áridas</i>	14
1.4.1 Experiencia en Laikipia, Kenya (FAO y MAGK, 2008)	14
1.4.2 Experiencia en México	16
1.5 Ciclos Biogeoquímicos	17
1.5.1 Ciclo del carbono	17
1.5.2 Ciclo del nitrógeno	19
2. JUSTIFICACIÓN	22
3. OBJETIVOS	23
4. MATERIALES Y MÉTODOS	24
5.1 Zona de estudio	24

5.2 Recolección de muestras	26
<i>Acondicionamiento de la muestra</i>	26
5.3 Montaje del experimento	27
5.3.1 Incubación de las muestras	27
5.3.2 Seguimiento de las dinámicas de C y N	28
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
<i>Dinámica de carbono: Producción de CO₂</i>	32
<i>Dinámica de nitrógeno: Volatilización de NH₃ y producción de NH₄⁺, NO₂⁻ y NO₃⁻</i>	34
<i>Dinámica de la población microbiana: C_{biomasa}</i>	39
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	41
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	42
ANEXO	45

Índice de cuadros

Cuadro 1.	Características físicas y químicas de los suelos bajo estudio.....	Pág. 23
-----------	--	------------

Índice de figuras

Figura 1.	Acoplamiento de herramientas en tándem para la siembra del trigo en una sola pasada.....	Pág. 10
Figura 2.	Siembra directa de una segunda siembra después de trigo.....	11
Figura 3	Ciclo del carbono	18
Figura 4	Ciclo del nitrógeno	19
Figura 5.	Ubicación geográfica de los sitios de estudio.....	24
Figura 6.	Recolección de bloques inalterados de suelo.....	26
Figura 7.	Jarra de incubación con el bloque de suelo y los viales para la captación de CO ₂ y formas de nitrógeno inorgánico.....	27
Figura 8.	(a) Muestras preparadas para la fumigación y (b) fumigación de las muestras en presencia de cloroformo, con vacío.....	31
Figura 9.	Producción de CO ₂ en los suelos de estudio: a) La unión y b) Tultengo. Las barras representan la desviación estándar (n=3), ss: suelo seco.....	32
Figura 10.	Volatilización de NH ₃ en los suelos de estudio: a) La Unión y b) Tultengo. Las barras representan la desviación estándar (n=3), ss: suelo seco.....	35
Figura 11.	Producción de NH ₄ ⁺ en los suelos de estudio: a) La Unión y b) Tultengo. Las barras representan la desviación estándar (n=3), ss: suelo seco.....	36
Figura 12.	Producción de NO ₂ ⁻ en los suelos de estudio: a) La Unión y b) Tultengo. Las barras representan la desviación estándar (n=3), ss: suelo seco.....	37
Figura 13.	Producción de NO ₃ ⁻ en los suelos de estudio: a) La Unión y b) Tultengo. Las barras representan la desviación estándar (n=3), ss: suelo seco.....	38
Figura 14.	Dinámica de la población microbiana en los suelos de estudio: a) La Unión y b) Tultengo. Las barras representan la desviación estándar (n=3), ss: suelo seco.....	39

NOTACIONES Y UNIDADES

C_{biomasa}	Carbono de la biomasa
CE	Conductividad eléctrica
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
C_{org}	Carbono orgánico
CRA	Capacidad de retención de agua
C_{sol}	Carbono soluble del suelo
dS/m	Decisiemens por metro
FAO	Food and Agriculture Organization
FIRA	Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura
INAFED	Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal.
LUCs	Suelo de La Unión bajo labranza de conservación
LUCv	Suelo de La Unión bajo labranza convencional (suelo control)
N_2O	Óxido nitroso
NH_3	Amoniac o gas de amonio
NH_4^+	Ion amonio
N_i	Nitrógeno inorgánico
NO_2^-	Ión nitrito
NO_3^-	Ión nitrato
NOM	Norma Oficial Mexicana
P/ETP	Relación precipitación / evapotranspiración
PET	Polietilentereftalato
PVC	Policloruro de vinilo
s.s.	Suelo seco
TU1Cs	Tultengo bajo labranza de conservación
TU2Cs	Tultengo 2 bajo labranza de convencional
TUCv	Tultengo bajo labranza convencional (suelo control)

RESUMEN

La materia orgánica del suelo juega un papel determinante en el ciclo biogeoquímico del carbono, toda vez que, casi el 74% del carbono orgánico activo está almacenado en el suelo. A su vez, los sistemas de labranza y de manejo de los residuos en los suelos impactan en el comportamiento y la composición de la materia orgánica del suelo. En este estudio se investigó el efecto del sistema de labranza de conservación sobre la dinámica de mineralización del carbono y del nitrógeno de la materia orgánica. Se trabajó con suelos de la zona cebadera del altiplano central, los cuales tenían nueve años bajo manejo en el sistema conservacionista. Como suelos control se usaron suelos trabajados con el sistema convencional. Las dinámicas de mineralización se estudiaron a escala laboratorio mediante el seguimiento de la producción de CO_2 , NH_3 , NH_4^+ , NO_2^- y NO_3^- . Así mismo, se monitoreó el comportamiento de la biomasa microbiana. Los resultados obtenidos mostraron que los suelos presentan una biomasa microbiana que mineraliza activamente la materia orgánica con tasas de producción de CO_2 entre 9 y 37 mg C- CO_2 /kg ss/d en Tultengo y entre 8 y 26 mg C- CO_2 /kg ss/d en La Unión. Las dinámicas de NH_3 , NH_4^+ , NO_2^- y NO_3^- revelaron que la nitrificación se lleva a cabo de manera fluida, bajo las condiciones de pH, temperatura y humedad de la incubación. Estas mismas dinámicas evidenciaron una deficiencia de nitrógeno en los suelos, que posiblemente es la condición que hace que las emisiones de CO_2 sean menores a las de suelos con características fisicoquímicas y de manejo similares y que por lo tanto puedan estar actuando como sumideros de carbono.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Participación del suelo en la producción de gases con efecto invernadero

Los gases con efecto invernadero (GEI) absorben parte de la radiación infrarroja emitida por la superficie de la tierra, por la misma atmósfera y por las nubes. Como resultado de esta radiación absorbida, la temperatura de la troposfera se eleva, éste es el efecto invernadero natural; el cual ha hecho posible que la temperatura de la Tierra se mantenga aproximadamente a 15°C y con ello el agua en estado líquido (IPCC, 2001).

Los GEI son gases traza, cuya concentración ha incrementado en la troposfera como consecuencia de las actividades antropogénicas. Si la concentración de GEI aumenta, se favorece el efecto invernadero y la temperatura de la troposfera se eleva. Al efecto anterior se le denomina efecto invernadero antropogénico y se considera el responsable del calentamiento global (Leroux, 2005).

Los gases con mayor efecto invernadero son: el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) y su contribución al calentamiento global es 70%, 23% y 7%, respectivamente (IPCC, 2001). Su producción proviene principalmente de la industria, el transporte, la generación de energía eléctrica y la agricultura. Esta última contribuye con aproximadamente el 20% del total de gases invernadero de origen antropogénico (Lokupitiya y Pautian, 2006).

Aunque no se conoce con certeza el escenario que provocarán los GEI en el futuro, se prevé que habrá serios efectos negativos, por lo que es necesario tomar medidas para reducir sus emisiones y para incrementar su captura en los suelos y en la biomasa. Para ello, se deben desarrollar nuevas estrategias para el manejo de la agricultura y los bosques. La captura de carbono en los suelos agrícolas y forestales se incluye en el Protocolo de Kyoto como “Uso de la tierra, Cambio en el uso de la tierra y forestación” y concierne a los artículos 1.3 y 1.4 del protocolo (FAO, 2002).

Con la puesta en marcha de acciones que incrementen la captura de carbono en los suelos se espera, que haya cambios importantes en la forma del manejo de los suelos, en sus propiedades agrícolas o ambientales y sobre la biodiversidad. Las prácticas de manejo deberán ser más sostenibles, lo que ayudará a prevenir o mitigar la degradación del suelo.

La agricultura de conservación es una de las herramientas que se han propuesto para incrementar el contenido de materia orgánica en el suelo y disminuir su mineralización. Sin embargo, también se tiene conocimiento de que este tipo de labranza con sus diferentes variantes, no tienen el mismo efecto sobre los suelos como sumideros de carbono. Las diferencias observadas obedecen a las condiciones edafoclimáticas de los lugares y

también a la forma como se manejan los residuos de la cosecha. En general se ha observado que con el sistema conservacionista pueden ser capturadas entre 0.5 y 1.0 Mg C/año en condiciones templado-húmedas, de 0.2 a 0.5 Mg C/año en los trópicos húmedos y de 0.1 a 0.2 Mg C/año en las zonas semiáridas (Lal, 1999).

1.2 La labranza del suelo

La labranza es cualquier manipulación mecánica que altere la estructura del suelo con la finalidad de lograr las condiciones físicas apropiadas para el desarrollo de las plantas. Otro propósito de la labranza es el control de plagas y malezas (Navarro, 2000).

Tradicionalmente la labranza se realiza con la ayuda de un arado que penetra en el suelo e invierte la tierra. Con esta acción se arrancan las malas hierbas que crecen en el terreno y al mismo tiempo se aflojan las capas superficiales del suelo. La labranza es una actividad que debe hacerse antes de las primeras lluvias o del riego, para que el agua pueda penetrar fácilmente en el suelo y se conserve la humedad para garantizar la germinación de las semillas. Una vez que la planta emerge, sus raíces podrán desarrollarse adecuadamente y el medio edáfico tendrá la porosidad necesaria para que circulen el agua y el aire (Bloggs, 2000).

Villa (1998) indica que las operaciones de labranza pueden clasificarse en dos grupos: labranza primaria y labranza secundaria, cuyas principales características se comentan a continuación.

Labranza primaria

La labranza primaria constituye el primer grupo de operaciones que actúan sobre el suelo antes de establecer un cultivo. Su acción puede ser superficial (de 0 a 30 cm), cuando la finalidad es ayudar a preparar la cama de siembra, o bien puede ser profunda (hasta 1 m) cuando se desea mejorar las condiciones de permeabilidad del suelo, rompiendo capas profundas compactadas para preparar la cama de raíces. La labranza primaria se realiza con arados de vertedera, de discos, cinceles y subsoladores.

Labranza secundaria

La labranza secundaria comprende todas las operaciones que se realizan a profundidades de 0 a 15 cm de profundidad en un suelo previamente arado. Su finalidad es lograr en el suelo las mejores condiciones para el desarrollo del cultivo. Por lo tanto, incluye operaciones previas a la siembra, para preparar la cama de semillas así como operaciones que se efectúan durante el desarrollo del cultivo, especialmente para crear surcos para el riego y controlar malezas. Existe una gran variedad de herramientas que se

pueden emplear para realizar las operaciones de la labranza secundaria, entre las que se tienen: rastras de discos, resortes o clavos, rodillos, niveladoras, surcadores, entre otros.

La diversidad de herramientas o aperos disponibles para las operaciones de labranza es muy amplia, y su selección deberá atender a las condiciones del terreno y a los requerimientos del cultivo. La selección incorrecta de las herramientas y/u operaciones pueden tener efectos perjudiciales para el suelo. La situación anterior se presenta con frecuencia, debido a que la labranza se realiza más como una tradición que como una actividad planificada de acuerdo a las necesidades de cada situación.

Existen numerosas investigaciones que han demostrado que hay que manipular el suelo lo menos posible, realizando unas cuantas o ninguna labor antes de la siembra. Una preparación adecuada de la cama de siembra debe cuidar dos aspectos fundamentales; no dañar las propiedades físicas del suelo y reducir los costos. Actualmente existen diversos sistemas de labranza entre los que los agricultores pueden seleccionar, el que responda mejor a las necesidades del terreno y del cultivo en cuestión.

En los siguientes párrafos se comentan las principales características de los sistemas de labranza de acuerdo a la clasificación hecha por la American Society of Agricultural Engineers (ASAE, 1982).

1.2.1 Labranza convencional

Es aquella que implica trabajar el suelo en toda su superficie con arados y rastras en pasadas independientes para cada herramienta. Su propósito es crear la cama para el desarrollo de las raíces, a la profundidad necesaria para el cultivo a sembrar, y la cama de semillas con la consistencia acorde con la profundidad de siembra, el contenido de humedad y el tamaño de las semillas. La labranza convencional hace uso de las operaciones propias de las labranzas primaria y secundaria.

El arado es una de las herramientas más antiguas y es considerada un símbolo de la agricultura. Sin embargo, desde 1909 se han publicado investigaciones en las que se le expone como uno de los principales causantes de la erosión del suelo.

Al arar el suelo se crea una discontinuidad entre la parte arada y la no arada. Los agregados de la capa arada no tienen cohesión entre sí, lo que los hace estar indefensos a la acción del agua y el viento. Un ejemplo importante de esta situación son los barbechos, que dejan el terreno así preparado descubierto por meses antes de su siembra. Además, si se trabaja el suelo con un contenido inapropiado de humedad se presentan varios problemas. Si está seco aumenta el consumo de potencia y no se separan los agregados, formándose terrones grandes y duros, muy difíciles de disgregar, y si está muy

húmedo se crea el llamado pie de arado por el roce y presión por el paso del arado en el fondo del surco (Villa, 1998).

No obstante sus efectos negativos, el arado continuará empleándose en cultivos como los tubérculos y hortalizas, que exigen una cama de raíces profunda. Sin embargo, en cultivos menos demandantes, los sistemas de labranza reducida y de conservación tendrán cada vez más aplicación.

1.2.2 Labranza de conservación

La labranza de conservación consiste en el uso y manejo de los residuos de la cosecha anterior (mantillo o cama) cubriendo al menos un 30% de la superficie del suelo con la menor remoción posible del suelo (Novelo, 2000). En sus distintas manifestaciones, como la labranza vertical, reducida o mínima y la no labranza o labranza cero, es una respuesta al pretendido productivismo de la revolución verde, ya que son labranzas de conservación que propician la conservación del recurso suelo-agua (Tamames, 2002).

Según Sayre y Govaerts (2007), los tres principios fundamentales de la labranza de conservación son:

- 1) Eliminar todos los movimientos del suelo, a excepción de la perturbación que se causa cuando se siembra.
- 2) Preservar una cubierta orgánica permanente o semipermanente a través de un cultivo en pie o una capa de rastrojo en el suelo.
- 3) Rotar los cultivos económicamente viables.

1.2.3 Labranza vertical

La labranza vertical del suelo es uno de los métodos más apropiados para trabajar el suelo sin que los horizontes cambien su posición relativa. De esta manera no queda una separación neta entre la parte removida y la que no lo está. La fracturación del suelo se logra por el efecto de vibración de los elementos mecánicos que se emplean, y puede extenderse vertical u horizontalmente cuando el suelo está seco y se utiliza la herramienta apropiada.

La labranza vertical, al trabajar verticalmente el suelo y mantener cobertura vegetal sobre la superficie, contribuye a su conservación. Entre los beneficios que aporta se tienen el favorecer la infiltración, eliminar costras, limitar la evaporación y evitar el movimiento superficial del suelo por acción del agua y el viento (Navarro, 2000).

1.2.4 Labranza mínima

La labranza mínima se puede definir como realizar el menor número de pasadas en el suelo para obtener una buena germinación y desarrollo de las semillas, y que resulte una buena población de plantas. La idea general se basa en trabajar en trenes de herramientas de manera que en una sola pasada, o máximo dos, se realice la preparación total del suelo y la siembra en conjunto.

La labranza mínima es un principio muy vasto que se puede emplear de muchas maneras. Puede variar de acuerdo con el tipo de suelo, de cultivo, del clima y de los equipos disponibles al combinar arados, rastras y sembradoras. El ejemplo más común de labranza mínima es realizar dos o más labores en una sola operación, acoplando al tractor varias herramientas en tándem, como se observa en la Figura 1. El mercado de máquinas agrícolas a nivel nacional e internacional ofrece variados diseños que se pueden utilizar en labranza mínima, entre los que se destacan las combinaciones de rastras y rodillos, sembradoras con acondicionadores de la cama de semillas, abresurcos especiales y ruedas tapadoras.

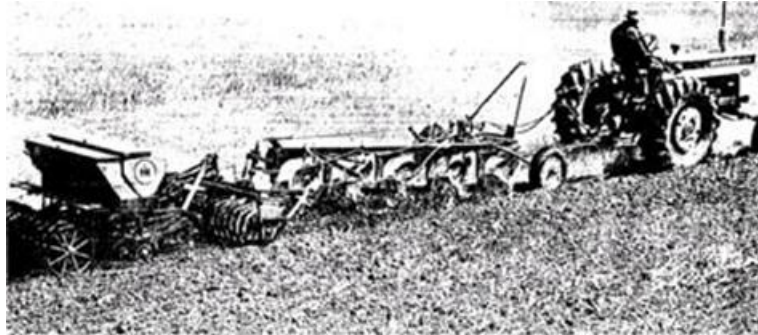


Figura 1. Acoplamiento de herramientas en tándem para la siembra del trigo en una sola pasada

Fuente: Villa (1998)

1.2.5 Siembra directa

La siembra directa, también llamada labranza cero, consiste en realizar la colocación de las semillas sin labranza previa del suelo, con presencia del rastrojo del cultivo anterior. Esto se hace con una máquina sembradora de diseño especial (Figura 2), cuyo funcionamiento se basa en un abresurco que prepara un pequeño surco el cual forma una angosta cama de semillas, la que facilita su desarrollo radicular. Los demás componentes, disco sembrador, disco para aplicar fertilizante y rueda tapadora y prensadora son

iguales a los de una sembradora tradicional. Posteriormente, el cultivo permanece sin otros trabajos en el suelo (Villa, 1998).



Figura 2. Siembra directa de una segunda siembra después de trigo

Fuente: Villa (1998)

1.3 Beneficios que aporta la labranza de conservación

Beneficios para los productores

Según Tamames (2002), los agricultores se ven beneficiados al reducirse las horas y el tiempo de trabajo y en consecuencia, los gastos laborales. También hay menos uso y desgaste de la maquinaria agrícola, por lo tanto disminuyen los gastos en reparaciones y en consumo de combustibles. Otro ahorro económico lo representa la disminución del uso de herbicidas e insecticidas, ya que la rotación con varias especies impide el desarrollo de las malezas y las plagas. Así mismo, hay un incremento gradual en la productividad a causa de la mejora en la fertilidad del suelo al incrementar la materia orgánica. La producción es más estable, particularmente en los años secos, debido a la mayor infiltración del agua. Finalmente, se refuerza la seguridad alimentaria porque los productores son apoyados con capacitación y financiamiento para mejorar la producción y conservar sus tierras de cultivo.

Beneficios para el suelo

De acuerdo con los datos reportados por la FAO (1992) y Novelo (2000), la protección del suelo, ya sea con un cultivo vivo o bien con residuos de la cosecha anterior; reporta los siguientes beneficios al suelo: disminuye la pérdida de suelo por erosión, incrementa la materia orgánica y la degradación de ésta libera nutrientes de forma progresiva para las plantas, hace que la infiltración sea más lenta, disminuye la evaporación e incrementa la actividad biológica del suelo. También disminuye la densidad aparente, incrementa la

estabilidad de los agregados y disminuye el encostramiento. A continuación se comentan brevemente los impactos benéficos mencionados.

Menores pérdidas de suelo por erosión: La intensidad de los agentes erosivos varía dependiendo de las combinaciones de clima, topografía y tipo de suelo. En terrenos con pendientes fuertes con labranza tradicional se pierden hasta 140 Mg/ha/año, mientras que en terrenos con labranza de conservación con más de 80% de residuos sobre el suelo, esta pérdida es de 17 ton/ha/año.

Incremento de la materia orgánica: La capa de residuos que se deja sobre la superficie del suelo incrementa el contenido de materia orgánica en él y promueve una mayor actividad biológica. Sin embargo, la disponibilidad de nitrógeno en los primeros años de empleo de la labranza de conservación se reduce debido a una degradación más lenta de los residuos acumulados en la superficie. En general se recomienda aplicar entre un 20 y un 30% adicional a la dosis de nitrógeno durante los primeros años del establecimiento del sistema de labranza.

Infiltración más lenta del agua: La labranza de conservación presenta una mayor tasa de infiltración, debido a la creación de poros más grandes y continuos y a la presencia de un mantillo vegetal que reduce la velocidad de escurrimiento y favorece la percolación.

Disminución de la evaporación: En los suelos con una cobertura de mantillo la evaporación superficial se reduce considerablemente al disminuir la incidencia directa de los rayos del sol. Esto se debe al aislamiento del suelo por una alta humedad relativa entre el mantillo y la superficie de éste para aumentar la eficiencia del uso del agua por el cultivo.

Aumento de la actividad biológica: La labranza de conservación incrementa la población de hongos micorrízicos y la presencia de la cobertura de residuos aumenta la población de lombrices. Estas últimas producen orificios que actúan como canales continuos por los que pueden circular rápidamente el agua y el aire.

Disminución de la densidad aparente: La labranza convencional tiende a incrementar paulatinamente la densidad aparente del suelo, por lo que se requiere cada vez de más pasos de equipo de laboreo. A diferencia de ella, la labranza de conservación mantiene o disminuye la densidad aparente, debido a los huecos que quedan después de la degradación de las raíces y por la actividad de las lombrices.

Mejora de la estabilidad de los agregados: El grado de la estabilidad de los agregados de un suelo depende de la cantidad de residuos que se hayan dejado, de la materia orgánica y de la biomasa microbiana presente en él. A mediano plazo (5-7 años) la labranza de conservación mejora la agregación de las partículas del suelo.

Disminución del encostramiento: La formación de costras sobre la superficie del suelo se favorece cuando se deja descubierto y expuesto al impacto de las gotas de lluvia, que

dispersan las partículas de arcilla y limo. El encostramiento restringe la germinación y emergencia de las plantas, impide la infiltración y promueve altas temperaturas. En cambio, la cobertura de residuos disminuye el efecto de las gotas de lluvia y de esta manera previene la formación de costras.

Beneficios para el medio ambiente

Los beneficios ambientales son diversos. En el compartimento hídrico se han observado los siguientes efectos: hay un mayor reabastecimiento de los acuíferos al mejorar la infiltración del agua, disminuyen los contaminantes de origen edáfico (fitosanitarios, partículas de arena, limo, arcilla, nutrientes, microorganismos, metales tóxicos, etc.) en las aguas superficiales al disminuir la erosión, así como en los acuíferos al haber menor lixiviación. La calidad atmosférica también se ve beneficiada porque se reduce la emisión de CO₂, toda vez que los suelos bajo labranza de conservación pueden actuar como sumideros de carbono. También hay menos emisiones de los motores de la maquinaria agrícola. Finalmente, las situaciones meteorológicas extremas (como huracanes, exceso y escasez de lluvia, heladas, entre otros) producen menos repercusiones en el suelo y por ende en el resto de los compartimentos ambientales (Tamames, 2002).

1.4 La labranza de conservación en las zonas semiáridas

La calidad de la mayoría de los suelos del mundo usados para la agricultura ha disminuido considerablemente. Una de las principales causas de esta degradación edáfica ha sido la pérdida de la materia orgánica después de casi 40 años de aplicación de sistemas convencionales de labranza. Sin embargo, se ha constatado que este proceso de degradación es reversible. En muchos lugares con climas húmedos y subhúmedos y en cultivos bajo riego, el contenido de materia orgánica se ha incrementado rápidamente (3-5 años) después de cambiar las prácticas de manejo de los suelos hacia la agricultura de conservación, que incluye labranza cero, labranza mínima y la retención de residuos sobre la superficie del suelo. Incluso en condiciones semiáridas como en el sur de Texas, el sistema es eficiente, si bien con menores tasas de captura de carbono (FAO, 2002).

Dados los problemas ambientales que enfrenta el mundo actualmente, la labranza de conservación se ha considerado como una alternativa muy atractiva, no sólo por su efecto sobre la calidad de los suelos, sino también como una opción para disminuir la emisión del CO₂ que contribuye al efecto invernadero.

Si bien el contenido de carbono y la capacidad para fijar CO₂ por unidad de superficie en las tierras áridas son bajos, pueden hacer una contribución importante a la captura global de carbono y al mismo tiempo prevenir o disminuir la tasa de desertificación (FAO, 2002).

Las tierras áridas se definen por el índice de aridez que representa la relación de la precipitación con la evapotranspiración potencial (P/ETP) con valores <0.05 para tierras hiperáridas, <0.20 para tierras áridas y de 0.20 a 0.50 para tierras semiáridas. Estas son las tierras secas más características, pero a menudo la zona árida subhúmeda (0.50-0.65) también se incluye en la misma categoría (Middleton y Thomas, 1997). Las tierras áridas representan cerca del 40 por ciento de las tierras de la Tierra. Las zonas hiperáridas naturales cubren un área estimada en 1 000 millones de hectáreas mientras que las tierras áridas, semiáridas y áridas subhúmedas cubren un área de 5 100 millones de hectáreas (FAO, 2002).

Importancia de las zonas áridas

La importancia del estudio de las zonas áridas radica en que constituyen uno de los ecosistemas más extensos del mundo (40-45 millones de km²), un tercio de la superficie terrestre, y en donde el agua es causa de conflictos de ámbito internacional y su manejo eficiente se vuelve estratégico (Porta et al., 1999). Además, estas zonas proporcionan la quinta parte de los suministros de alimentos, producen la mitad de los metales preciosos y contienen la mayor reserva mundial de petróleo y gas natural (FAO, 2002).

En los siguientes párrafos se comentan algunas experiencias acerca de la aplicación de la labranza de conservación en zonas semiáridas.

1.4.1 Experiencia en Laikipia, Kenya (FAO y MAGK, 2008)

El Distrito de Laikipia se halla en la sombra pluviométrica del Monte Kenya, con un régimen de lluvias, escaso y de distribución desigual. La problemática que se presenta en esta región involucra los siguientes factores: i) el clima es predominantemente semiárido; ii) el 75 % del total de la superficie del territorio está dedicado a la producción ganadera y a parques/reservas de caza, lo que ha provocado una sobrepoblación de animales que genera una elevada tasa de degradación del suelo y del medio ambiente; iii) el rendimiento de la mayoría de los cultivos cosechados por los agricultores ha descendido alrededor de un 40 % debido a diversas causas, entre las cuales destaca el laboreo como una de las más importantes y iv) el control de las malezas representa un alto costo.

En este distrito, la FAO y el Ministerio de Agricultura del gobierno de Kenya (MAGK) aplicaron durante 2004-2006 un programa llamado Agricultura de Conservación para el proyecto de Agricultura y Desarrollo Rural Sostenibles, en el que se involucró a pequeños agricultores de las zonas semiáridas, específicamente a familias afectadas con el VIH/SIDA.

La adopción de la agricultura de conservación consistió en suprimir la labranza del suelo y protegerlo con cubiertas vegetales vivas (dos variedades de frijol: *Dolichoslablab* y *Mucunaspp*) y cubiertas muertas (rastros de maíz) y en hacer rotación de cultivos. Para hacer la transferencia del sistema conservacionista se construyeron dos escuelas en donde se capacitó a instructores radicados en la aldea, quienes a su vez se encargaron de capacitar a un grupo de 55 agricultores.

Los impactos positivos en los recursos naturales fueron los siguientes: reducción de la escorrentía del suelo en un 60%, mejora en la infiltración del agua en un 70%, reducción de la evaporación del agua del suelo en un 30% y aumento de la fertilidad del suelo. En este último rubro, se encontró que la cobertura de rastrojo de maíz añadió al suelo (en peso seco): 0.7% de nitrógeno, 0.14% de fósforo, 1.43% de potasio y 0.36% de calcio. Aunque estas cifras son muy pequeñas, significaron el inicio del revertimiento del proceso de degradación que experimentaban estos suelos.

Los beneficios en la calidad de vida de los usuarios fueron: mejora de la seguridad alimentaria como resultado de un aumento en el rendimiento de las cosechas en un 30-40%, mejora en la nutrición familiar al tener una reserva suficiente de alimentos en los hogares e incremento del 10% en el ingreso familiar por la venta de los excedentes obtenidos en la producción de los cultivos. También se redujo la necesidad de mano de obra en más de un 40%, gracias a la práctica del cultivo sin laboreo y a la disminución del deshierbe mecánico.

Los beneficiarios directos del proyecto fueron sin duda los agricultores participantes y sus familias, mientras que de manera indirecta se beneficiaron los arrendadores de equipos, tractores y animales de tiro y las compañías proveedoras de semillas, abonos y productos químicos. Así como las compañías generadoras de energía hidroeléctrica situadas aguas abajo, quienes se beneficiaron del descenso de la sedimentación en los embalses gracias al cultivo sin laboreo.

Algunos problemas con los que aún lidian los agricultores participantes en la experiencia son: el control de las malezas, ya que hay renuencia a usar herbicidas; el manejo del cultivo de cobertura, el *Dolichoslablab*, que es susceptible a varias enfermedades y al ataque por nematodos. También es crucial vigilar su desarrollo para que no supere y sofoque al cultivo principal. Pese a que los inconvenientes anteriores representan un reto importante, el balance de los resultados del proyecto es bastante alentador y constituye un avance muy importante para la recuperación de los suelos de la zona y el apoyo a comunidades marginales.

1.4.2 Experiencia en México

Los primeros trabajos científicos sobre la labranza de conservación en México se establecieron en 1975 por el Centro de Investigación para el Mejoramiento del Maíz y el Trigo (CIMMYT). A partir de 1988, derivado de reuniones entre este centro y el FIRA, se inició con la promoción y difusión del sistema de labranza de conservación en el Bajío. Por más de 10 años, el CIMMYT desempeñó trabajos sobre labranza de conservación en zonas productoras de maíz en Chiapas, Veracruz, Jalisco y Oaxaca. En 1978, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) inició la introducción y transferencia de la tecnología de siembra de trigo en camas (surcos) a los agricultores en el Valle Yaqui en Cd. Obregón, Sonora. Posteriormente, en 1995 este mismo instituto, en colaboración con el FIRA, introdujo el sistema conservacionista en los estados de Hidalgo y Tlaxcala para la producción de cebada de temporal.

En 1999 el CIMMYT inició un estudio de campo en su unidad experimental El Batán. Esta unidad se encuentra en el Estado de México, en la zona subtropical semiárida del altiplano central. El estudio tuvo como objetivo comparar el efecto de 14 tratamientos en los que incluía labranza convencional con incorporación de residuos y labranza de conservación con y sin camellones entre surcos, con retención total y parcial de los residuos y con remoción total de los residuos. En todos los tratamientos se hizo la rotación maíz-trigo o trigo-maíz. Ambos cultivos fueron fertilizados con 120 kg N/ha en forma de urea. Para el control de las malezas se usaron herbicidas. Posteriormente Patiño-Zúñiga et al. (2009) realizaron un experimento de laboratorio para evaluar el efecto de los tratamientos aplicados en campo sobre las dinámicas de carbono y nitrógeno y determinar si la producción de GEI (CO_2 , CH_4 y N_2O) disminuía con alguno de los tratamientos.

Los resultados encontrados por Patiño-Zúñiga et al. (2009) revelaron que ni el uso de camellones entre los surcos ni el sistema de labranza tuvieron efecto en las dinámicas de carbono y nitrógeno, mientras que el manejo de los residuos sí mostró repercusiones. En los suelos bajo labranza convencional la capacidad de retención de humedad decreció 1.1 veces y la conductividad eléctrica aumentó 1.3 veces en comparación con los suelos con el sistema conservacionista con retención total de residuos. Por otra parte, la capacidad de retención de humedad, el carbono orgánico, el nitrógeno total y la biomasa microbiana fueron 1.1 veces mayores en los suelos con labranza de conservación y retención total de residuos que en los suelos con el mismo sistema donde los residuos se removieron totalmente después de 6 años de la aplicación de sistema de conservación. Así mismo, la producción de CO_2 y de NO_3^- fue 1.2 y 1.8 veces mayor, respectivamente, en los suelos con el sistema conservacionista y retención total de residuos que en los suelos con remoción de residuos, mientras que entre los sistemas de labranza sólo encontraron diferencias en días específicos y no en la dinámica global. Los resultados anteriores indican que la cantidad de residuos en la cobertura es un factor determinante en las

dinámicas de mineralización de la materia orgánica, y por lo tanto en la función de los suelos como sumideros de carbono.

1.5 Ciclos Biogeoquímicos

Los ciclos biogeoquímicos esquematizan el movimiento continuo de la materia entre los receptáculos naturales, en donde intervienen los seres vivos, los cuales necesitan diversos compuestos para mantener su crecimiento y funciones vitales, tales como macronutrientes y micronutrientes u oligoelementos (Manahan, 1994).

Los nutrientes están limitados porque son escasos en el suelo y en otras fuentes; por lo cual se reciclan de tal manera, que se incorporan en plantas y animales o bien, quedan disponibles para que los microorganismos los asimilen por la descomposición de los restos de organismos muertos. De igual forma quedan disponibles para lixiviar cuando existen lluvias o riegos continuos. Las rutas de las fuentes a los sumideros y de regreso a éstas son los ciclos elementales y difieren para los diversos elementos (Henry y Heinke, 1999).

Los microorganismos actúan como reactores en los que tienen lugar una serie de procesos que evitan que los componentes orgánicos se acumulen indefinidamente. (Manahan, 1994).

1.5.1 Ciclo del carbono

El carbono es necesario en grandes cantidades como bloque básico de construcción de toda la materia orgánica. La fuente última de carbono es el CO_2 , el cual se transforma a compuestos orgánicos por la acción de la fotosíntesis (Reacción 1) (Henry y Heinke, 1999).



La fotosíntesis es una vía importante de producción de carbono nuevo en nuestro planeta, por lo que los organismos fototróficos se encuentran en la base del ciclo del carbono (Figura 3), y se encuentran casi exclusivamente dónde hay luz disponible (Manahan, 1994).

Las algas y las bacterias autótrofas también incorporan o fijan carbono del CO_2 atmosférico para producir carbohidratos y otras sustancias orgánicas complejas. Éstas se distribuyen a través de la cadena alimenticia y constituyen los tejidos de la materia viva (Henry y Heinke, 1999).

Los combustibles fósiles, las rocas carbonatadas y el CO_2 disuelto en los océanos son importantes reservas adicionales de carbono, aunque los dos primeros no son accesibles de manera natural para las plantas y los animales. El carbono de estas fuentes queda disponible cuando el CO_2 se libera durante la quema de combustibles fósiles y por descomposición microbiana, que transforma los carbonatos insolubles en bicarbonatos solubles (Henry y Heinke, 1999).

Existen diferentes maneras de verificar el retorno de CO_2 a la atmósfera y entre las más conocidas están: el proceso respiratorio de los humanos y los animales, los incendios forestales y la quema de combustibles fósiles. Otras cantidades también importante de CO_2 regresan a la atmósfera por la actividad de grupos bacterianos y fúngicos, los cuales utilizan materia orgánica como fuente de alimento, para obtener CO_2 y H_2O como productos finales, con lo cual completan el ciclo del carbono (Henry y Heinke, 1999).

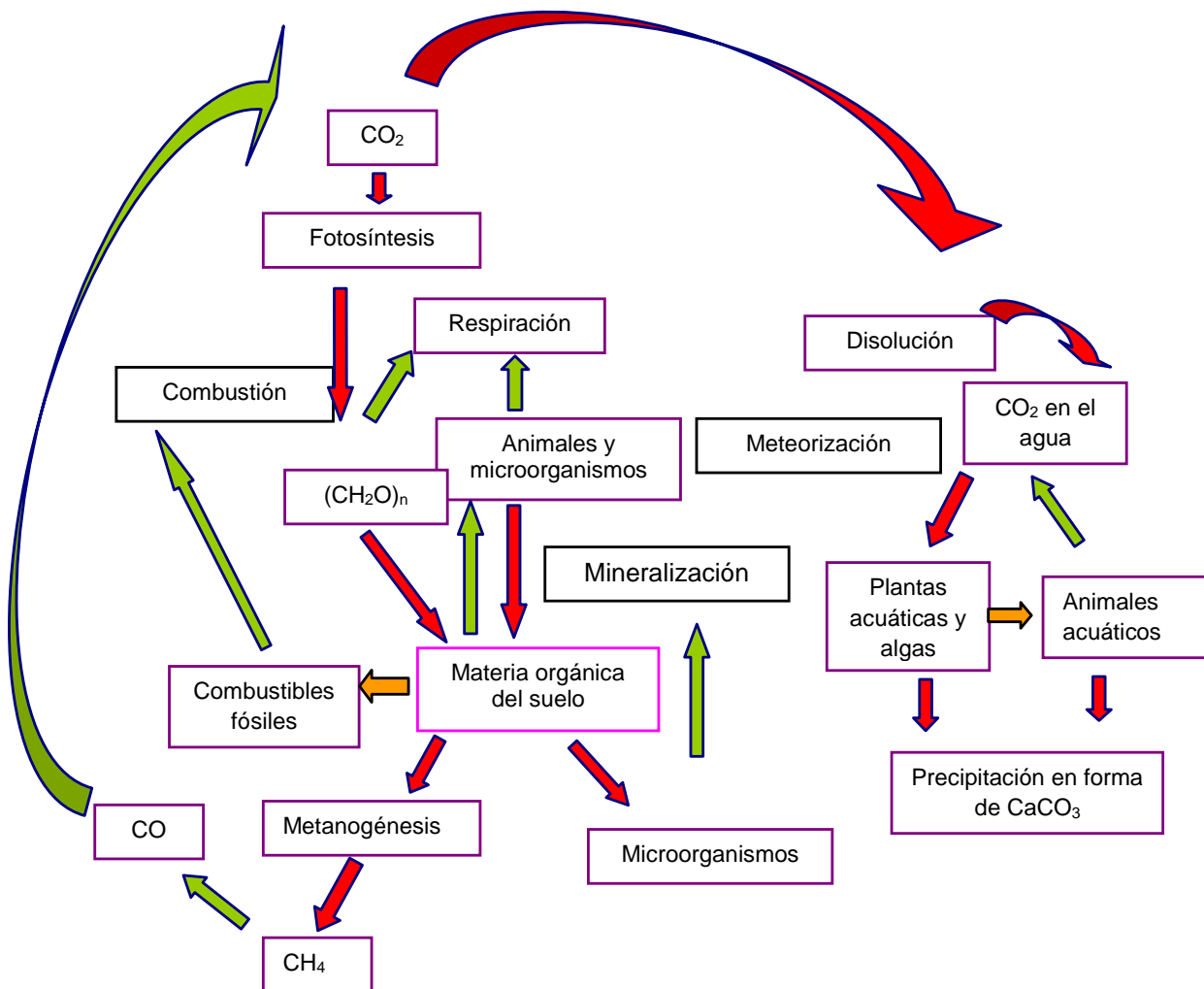


Figura 3. Ciclo del Carbono
Fuente: Adaptado de Porta et al. (1994)

1.5.2 Ciclo del nitrógeno

El nitrógeno al igual que el carbono es un elemento imprescindible para la vida, ya que es un constituyente de las proteínas y los ácidos nucleicos y procede de diversas fuentes. Se encuentra de manera prominente en todas las esferas del medio ambiente y presenta numerosos estados de oxidación ($\pm 2, 3, 4, 5$). La atmósfera está constituida en un 78% v/v por nitrógeno elemental, por lo que representa una fuente inagotable de este elemento (Henry y Heinke, 1999).

La molécula de nitrógeno es muy estable, por lo que su ruptura en átomos que puedan transformarse en formas nitrogenadas inorgánicas u orgánicas constituye la etapa limitante del ciclo del nitrógeno (Figura 4) (Manahan, 1994).

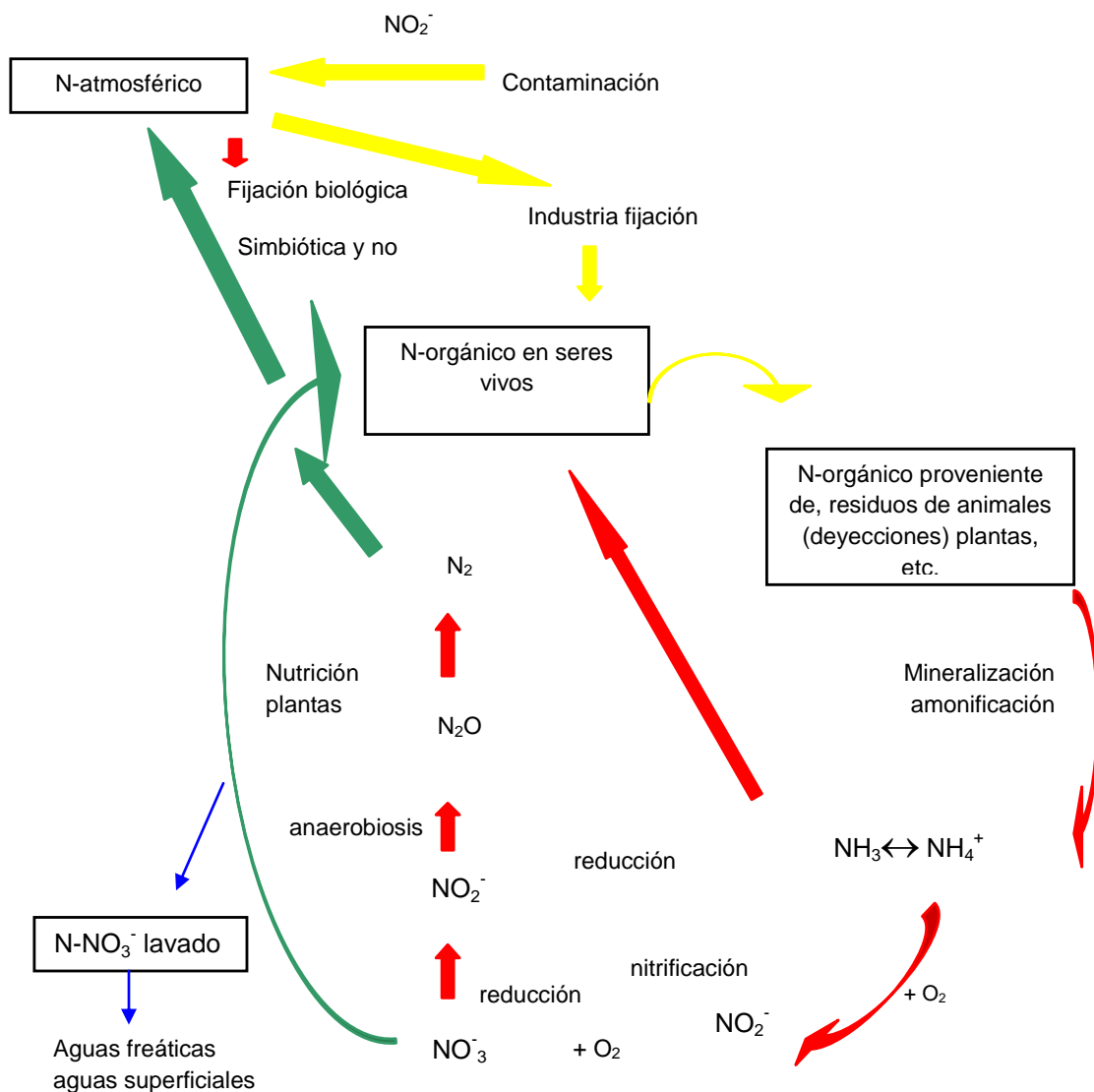


Figura 4. Ciclo del Nitrógeno
Fuente: Adaptado de Porta et al. (1994)

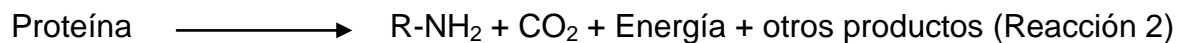
En la figura 4, las flechas amarillas indican las fuentes humanas de nitrógeno para el ambiente. Las flechas rojas señalan las transformaciones microbianas del nitrógeno. Las flechas azules indican las fuerzas físicas que actúan sobre el nitrógeno. Las flechas verdes indican los procesos naturales y no microbianos que afectan la forma y el destino del nitrógeno.

Los invertebrados excretan predominantemente amoníaco (NH_3), en tanto que los vertebrados eliminan además productos orgánicos. El hombre (como los animales) elimina el nitrógeno en forma de urea $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, la cual es rápidamente mineralizada por microorganismos del suelo y transformada en CO_2 y NH_3 .

Las etapas de transformación del nitrógeno se describen a continuación de acuerdo a su importancia dentro del ciclo (Porta et al., 1999):

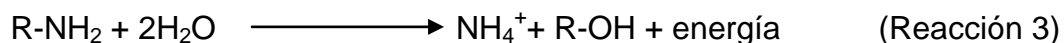
Aminización

El proceso de aminización consiste en la descomposición hidrolítica de las proteínas. La liberación de aminas y aminoácidos se lleva a cabo por bacterias y hongos heterótrofos, los cuales descomponen la materia orgánica y se representan esquemáticamente como:



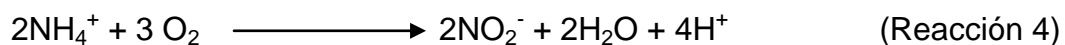
Amonificación

Durante este proceso, las aminas y los aminoácidos liberados en la aminización, son hidrolizados por otros organismos heterótrofos con la formación de compuestos amoniacales, como se muestra en la reacción 3.



Nitrificación

Es el proceso de oxidación biológica del NH_4^+ , el cual se lleva a cabo en dos etapas, primero es transformado a nitritos (NO_2^-) por bacterias heterótrofas del género *Nitrosomonas*, mediante la siguiente reacción:

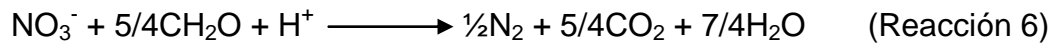


Y luego el NO_2^- es oxidado a nitrato (NO_3^-), por el grupo de bacterias autótrofas del género *Nitrobacter*, el cual es la principal sustancia nitrogenada del suelo (Reacción 5).



Desnitrificación

Es la reducción de NO_3^- en nitrógeno gaseoso en zonas deficientes de oxígeno. Debido a que muchos tipos de bacterias usan NO_3^- en lugar de oxígeno como aceptor final de hidrógeno, es necesaria la intervención de microorganismos heterótrofos y especies nitrogenadas como NO y N_2O . A través de este proceso el nitrógeno es removido del suelo y convertido en nitrógeno molecular (N_2) para pasar nuevamente a la atmósfera.



Los factores que afectan el proceso de nitrificación son: el suministro del ion NH_4^+ , la población de organismos nitrificantes, el pH, la aireación, la humedad y la temperatura del suelo.

2. JUSTIFICACIÓN

En los estados de Hidalgo y Tlaxcala se han realizado algunos esfuerzos para la adopción del sistema de labranza de conservación; sin embargo, no se ha efectuado un seguimiento de los suelos para conocer cómo ha afectado el sistema conservacionista el funcionamiento biológico del suelo. Por ello, esta investigación se centró en el estudio de la mineralización de la materia orgánica en suelos de cebaderos del altiplano central, para determinar si la adopción del sistema conservacionista ha contribuido a disminuir la tasa de mineralización y con ello la emisión de CO₂, así como en evaluar el efecto del sistema sobre la dinámica del nitrógeno y de la biomasa microbiana.

3. OBJETIVOS

Objetivo general:

Evaluar el efecto de los sistemas de labranza de conservación y convencional en la captura de CO_2 y en los procesos de mineralización de la materia orgánica en suelos cebaderos, mediante el seguimiento de las dinámicas de carbono y nitrógeno.

Objetivos específicos:

Determinar, mediante el seguimiento de la dinámica del carbono, si los suelos bajo labranza de conservación actúan como sumideros de carbono.

Evaluar el efecto de los sistemas de labranza de conservación sobre la dinámica del nitrógeno, mediante el seguimiento de la producción de NH_3 , NH_4^+ , NO_3^- y NO_2^- .

Estudiar la dinámica de la población microbiana para determinar si el sistema de labranza afecta el funcionamiento biológico del suelo

4. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Zona de estudio

Para el estudio se seleccionaron tres sitios; uno en la comunidad La Unión, perteneciente al municipio de Calpulalpan, Tlaxcala (denominado LU de aquí en adelante en este trabajo) y dos en el poblado de Tultengo, perteneciente al municipio de Tepeapulco, Hidalgo (denominados TU1 y TU2). Los tres sitios son lugares donde se practica la labranza de conservación (denominada Cs) desde 1995, fecha en que fue introducido este sistema en ambos estados por los Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura (FIRA). Tanto en La Unión como en Tultengo, los suelos con labranza de conservación son sembrados con maquinaria específica para este sistema, sin la formación de surcos. Sin embargo, el manejo de los residuos es diferente; en Tultengo, se deja una cobertura de aproximadamente 10 cm de altura (de los tallos de la cebada) que cubre aproximadamente el 10% del terreno después de la cosecha. Posteriormente, esos residuos se incorporan parcialmente cuando se siembra, debido al ligero movimiento del suelo que provoca la sembradora. Mientras que en La Unión, se deja una cobertura prácticamente igual, pero al momento de la preparación de la cama de siembra, los residuos se incorporan en mayor medida que en Tultengo. Aledaño a cada sitio bajo labranza de conservación se contó con un sitio control, el cual ha sido manejado bajo el sistema de labranza convencional (denominado Cv). En este sistema, para la preparación de la cama de siembra, se aran los suelos y se forman surcos. Luego de la cosecha, se deja una cobertura similar a la de los suelos con labranza de conservación, la cual se incorpora completamente a la hora de formar los surcos. En los tres sitios de estudio, se practica el monocultivo de cebada con los dos sistemas de labranza. En la figura 5 se muestra la ubicación de los sitios y en el cuadro 1 sus características fisicoquímicas.

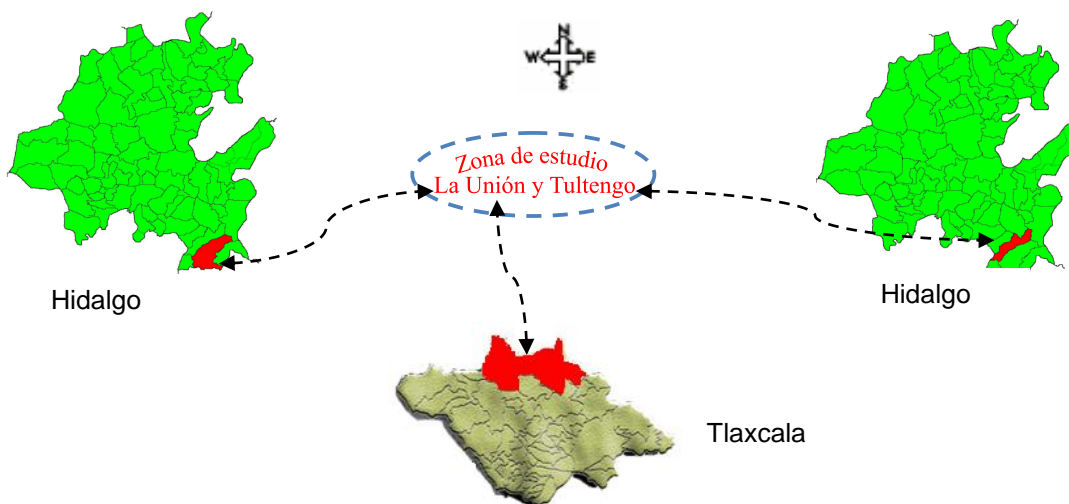


Figura 5. Ubicación geográfica de los sitios de estudio

Fuente: (INAFED, 2005)

Cuadro 1.Características físicas y químicas de los suelos bajo estudio

PARAMETROS	Tultengo Conservación (TUCs)	Tultengo Convencional (TUCv)	La Unión Conservación (LUCs)	La Unión Convencional (LUCv)
Humedad (%)	14.14	12.99	18.33	16.19
Densidad aparente (kg/l)	1.1797	1.02	1.16	1.14
Densidad real (kg/l)	2.3986	2.37	2.43	2.55
Textura*	Franco (25, 41, 33)	Franco (20, 43, 37)	Franco (9, 66, 25)	Franco (13, 59, 28)
pH	7.06 (neutro)	7.22 (neutro)	7.06 (neutro)	6.91 (neutro)
CE (dS/cm)**	0.55 (despreciable)	0.47 (despreciable)	0.20 (despreciable)	0.25 (despreciable)
CIC (cmol(+)/kg) ⁺	21.55 (alta)	22.03 (media)	36.22 (alta)	35.52 (alta)
Materia Orgánica (%)	4.9 (bajo)	4.10 (bajo)	3.5 (muy bajo)	3.2 (muy bajo)
C orgánico (%)	2.9	2.4	2.0a	1.9a
Fósforo (mg/kg)**	30.43(alto)	35.29 (alto)	11.75 (bajo)	9.08 (bajo)
N inorgánico (mg/kg)	15.8 (bajo)	27.42 (medio)	15.13 (bajo)	16.70(bajo)
N total (%) [°]	0.25	0.21	0.18b	0.16
MICRONUTRIENTES (mg/kg)				
Hierro	6.7001	7.0610	1.9915	1.5541
Zinc	0.5245	0.6796	0.5568	0.6973
Cobre	0.4147	0.3886	0.2046	0.3797
Níquel	0.0987	0.0951	0.1204	0.1443
Boro	ND	ND	ND	ND
METALES PESADOS (mg/kg)				
Cd	0.0385	0.0486	0.0385	0.0486
Cr	0.0217	0.0226	0.0022	0.0023
Pb	0.2295	0.4603	0.1420	0.2203

Fuente: Beltrán-Hernández et al. (2005)

*Textura: los números entre paréntesis indican los porcentajes de arcilla, arena y limo respectivamente.

**CE = Conductividad eléctrica, medida en el extracto de saturación.

+CIC = Capacidad de intercambio catiónico.

++El fósforo reportado, es el fósforo extraíble.

[°]N total = Nitrógeno total, estimado a partir de la materia orgánica

Tultengo y La Unión presentan características fisiográficas similares por estar ubicados en la planicie conocida como los llanos de Apan, área que comparten los estados de Hidalgo y Tlaxcala. Los llanos de Apan abarcan una extensión de 2184.83 km² delimitada por las coordenadas 20°04'48"-19°27'00" de latitud Norte y 98°38'24"-98°12'36" de longitud Oeste. Los poblados que comparten estos llanos son: Apan, Cd. Sahagún y Tepeapulco, del estado de Hidalgo y Calpulalpan de Tlaxcala. Las actividades económicas predominantes en la zona son la industria y la agricultura. El clima es templado subhúmedo y semiseco, con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 12-14°C, con una precipitación media anual de 600-700 mm y una evapotranspiración anual entre 1169-1294 mm. La comunidad La unión, Tlax., se ubica a 19°37' de latitud Norte y 98°17' de longitud Oeste, a una altitud de 2,600 msnm. El poblado de Tultengo, Hgo., se encuentra situado a 20 km de la Ciudad de Apan a 19°47' 08" de latitud norte y 98°33' 06" de longitud Oeste, a 2500 msnm de altitud (CONABIO, 2008). De acuerdo con la

clasificación propuesta por la FAO (2002), los llanos de Apan representan un área semiárida por presentar un índice de aridez igual a 0.52.

5.2 Recolección de muestras

Se estudiaron tres sitios bajo labranza de conservación denominados LUCs, TU1Cs y TU2Cs, así como los de labranza convencional denominados LUCv y TUCv respectivamente los cuales se emplearon como sitios control.

El muestreo se realizó en febrero de 2003; en cada sitio de estudio se recolectaron 18 muestras de suelo. Para la toma de las muestras se utilizaron tubos de policloruro de vinilo (PVC) de 3.8 cm de diámetro y 10 cm de largo, los cuales fueron introducidos en el suelo para obtener bloques inalterados de 9 cm de altura, cada uno de los cuales contenía aproximadamente 100 g de suelo (Figura 6). La obtención de bloques inalterados de suelo es importante en este tipo de estudios, ya que uno de los principios de la labranza de conservación consiste en no invertir el perfil del suelo, por lo que durante todo el experimento las muestras se conservaron dentro de los tubos.

La recolección de las muestras se realizó en forma aleatoria siguiendo el método AS-001 descrito en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos (Diario Oficial de la Federación, 2000)



Figura 6.Recolección de bloques inalterados de suelo

Acondicionamiento de la muestra

Se ajustó la humedad de todas las muestras a un 60% de su capacidad de retención de agua (CRA) de acuerdo al método reportado por Beltrán-Hernández et al. (1999), posteriormente se sometieron a un proceso de preincubación durante siete días. La

preincubación consistió en colocar las muestras dentro de un recipiente en el que se introdujeron también 4 recipientes con 200 ml de agua (para evitar la desecación) y 4 recipientes con 50 ml de NaOH 1N (para atrapar el CO₂ producido). Este proceso tiene la finalidad de proporcionar un tiempo suficiente para que la población microbiana se adapte a las condiciones en que serán incubadas posteriormente las muestras y de esta manera eliminar la adaptación como una causa de variaciones en los resultados durante el seguimiento de las dinámicas (López y López, 1978).

5.3 Montaje del experimento

5.3.1 Incubación de las muestras

Al término del periodo de preincubación se procedió a incubar las muestras, para lo cual, se emplearon jarras de incubación de 940 ml (Figura 7), dentro de las cuales se colocó el tubo de PVC conteniendo la muestra de suelo, además de un frasco con 20 ml de H₃BO₃, con una mezcla de indicadores rojo de metilo y azul de metileno, para captar el NH₃ volatilizado y otro frasco con 20 ml de NaOH 1N para captar el CO₂ producto de la mineralización de la materia orgánica. Una vez hecho lo anterior, cada jarra fue herméticamente cerrada para su incubación. Los periodos de incubación fueron 7, 14, 28, 42 y 70 días. Para cada periodo se incubaron 3 blancos, los cuales consistieron en una jarra con un frasco con 20 ml de H₃BO₃ y otro frasco con 20 ml de NaOH 1N, de esta manera se restaron el NH₃ y el CO₂ presentes en la atmósfera de la jarra durante la incubación. Al inicio del experimento se analizaron 3 muestras de cada suelo para obtener los datos del estado inicial. A estas muestras únicamente se les realizó la extracción de las formas de nitrógeno inorgánico, ya que se considera que al tiempo cero no hay producción de CO₂ ni volatilización de NH₃.



Figura 7. Jarra de incubación con el bloque de suelo y los viales para la captación de CO₂ y formas de nitrógeno inorgánico

5.3.2 Seguimiento de las dinámicas de C y N

Al término de cada periodo de incubación se seleccionaron al azar tres muestras de cada suelo y 3 blancos. El suelo contenido en cada tubo se mezcló perfectamente para obtener dos muestras de 40 g. Una muestra se empleó para hacer la extracción de las formas inorgánicas de nitrógeno y la cuantificación del carbono soluble y la otra para determinar el carbono contenido en la biomasa (C_{biomasa}), en los siguientes párrafos se comentan las determinaciones realizadas y en el Anexo se describen los métodos empleados en cada una de ellas.

5.3.2.1 Cuantificación del CO_2 producido

La cantidad de CO_2 producto de la mineralización de la materia orgánica, se cuantificó mediante la titulación del NaOH 1N que se introdujo en la jarra de incubación. Para la titulación, se usó una alícuota de 5 ml de NaOH, a la cual se le añadieron 20 ml de agua y tres gotas de fenolftaleína como indicador, posteriormente, se inició la primera titulación con H_2SO_4 2N, hasta obtener un color rosa tenue, para concluir la titulación se empleó H_2SO_4 0.0002N, hasta lograr la desaparición del color. Enseguida, se adicionaron 3 gotas de anaranjado de metilo como indicador y se inició la segunda titulación con H_2SO_4 0.0002N, hasta obtener el vire de amarillo pálido a amarillo naranja. El volumen de H_2SO_4 empleado en la segunda titulación fue el que se utilizó para calcular el CO_2 producido. Para su cálculo se empleó la ecuación 1.

$$\frac{\text{mg C} - \text{CO}_2}{\text{kg ss}} = \frac{(G_m - G_{\text{bco}}) * N * 12 * 4 * 1000}{m_s(1 - F_{\text{hum}})} \quad (1)$$

Donde:

G_m = Gasto de H_2SO_4 (0.0002N) para la muestra de suelo (ml)

G_{bco} = Gasto de H_2SO_4 (0.0002N) para el blanco (ml)

N = Normalidad del H_2SO_4 expresada (meq/ml)

12= miligramos de C por meq

4 = Factor para obtener el total (se usó una alícuota de 5 ml de un total de 20 ml)

m_s = Masa de suelo (g)

F_{hum} = Porcentaje de humedad expresado como fracción

ss= Suelo seco

5.3.2.2. Extracción de nitrógeno inorgánico (N_i) y cuantificación de carbono orgánico soluble del suelo (C_{sol})

En una botella de polietilentereftalato (PET) de 250 ml se mezclaron 40 g de suelo con 120 ml de K_2SO_4 0.5M, la cual se agitó a 180 rpm durante 30 minutos; posteriormente se filtró el sobrenadante, y se desecharon los sólidos retenidos por el filtro (Whatman núm.42). Se trabajó con el filtrado para cuantificar las diferentes formas solubles de N inorgánico (NO_2^- , NO_3^- y NH_4^+). Los NO_2^- y NO_3^- se determinaron usando los métodos colorimétricos de la α -naftilamina y el ácido fenildisulfónico, respectivamente, cuyas técnicas son descritas en el Anexo A (2 y 3). Las ecuaciones empleadas para la cuantificación de éstos son las siguientes (Fórmulas 2 y 3):

$$\frac{\text{mg N} - NO_2^-}{\text{kg ss}} = \frac{(\text{Abs} - 0.0039) * 0.010 * 12}{0.3226 * m_s(1 - F_{hum})} \quad (2)$$

$$\frac{\text{mg N} - NO_3^-}{\text{kg ss}} = \frac{(\text{Abs} - 0.0099) * 0.010 * 12}{0.3584 * m_s(1 - F_{hum})} \quad (3)$$

Donde:

Abs= Absorbancia

0.010L = 10 ml de alícuota

12 = Factor para obtener el total(se usó una alícuota de 10 ml y la extracción se realizó con 120 ml)

m_s = Masa de suelo (g)

F_{hum} = Porcentaje de humedad expresado como fracción

La cuantificación del C_{sol} del suelo se realizó digiriendo 10 ml del filtrado con $K_2Cr_2O_7$, HgO y una mezcla de H_2SO_4 y H_3PO_4 durante 30 minutos, para posteriormente valorar, con $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$, el cromo no consumido en la oxidación de la materia orgánica(Beltrán-Hernández et al., 1999). La ecuación empleada fue la siguiente (Fórmula 4):

$$\frac{\text{mg C} - CO_2}{\text{kg ss}} = \frac{(G_m - G_{bco}) * N * 12 * 4 * 1000}{m_s(1 - F_{hum})} \quad (4)$$

Donde:

G_m = Gasto de H_2SO_4 (0.0002N) para la muestra de suelo (ml)

G_{bco} = Gasto de H_2SO_4 (0.0002N) para el blanco (ml)

N = Normalidad del H_2SO_4 expresada en meq/ml

12 = Factor para obtener el total (se usó una alícuota de 10 ml y la extracción se realizó con 120 ml)

m_s = Masa de suelo (g)

F_{hum} = Porcentaje de humedad expresado como fracción

ss= Suelo seco

5.3.2.3 Fumigación de las Muestras: Cuantificación de $C_{biomasa}$

Para la medición del $C_{biomasa}$ se empleó el método fumigación-incubación y fumigación-extracción con cloroformo, que es uno de los más empleados para cuantificar C, N y P microbianos en suelos, por su simplicidad y rapidez (Luna-Guido et al., 2000). El método consiste en poner las muestras de suelo en contacto con vapores de cloroformo para provocar la lisis de las células microbianas durante un periodo de incubación y posteriormente, mediante una extracción, obtener el C y N solubles del suelo, además del $C_{biomasa}$ proveniente de las células lisadas.

El método se realizó de la siguiente manera: se colocaron 40 g de suelo en frascos de vidrio, los cuales se introdujeron en un desecador sin material desecante, al cual se le había colocado un papel humedecido sobre la placa de porcelana. En medio de las muestras se introdujo un frasco con 10 ml de cloroformo (Figura 8a), posteriormente se cerró el desecador, se abrió la llave de paso y se conectó a una bomba de vacío con la finalidad de lograr la ebullición del cloroformo, para saturar la atmósfera del desecador con los vapores de éste (Figura 8b). La ebullición se prolongó durante 15 minutos. Posteriormente, las muestras se incubaron durante 24 horas en la oscuridad a temperatura ambiente. Al término de este periodo, se abrió el desecador para retirar el frasco con cloroformo y se aplicó nuevamente vacío para eliminar sus vapores. En seguida, se realizó la extracción y la determinación del carbono. Finalmente, se empleó la fórmula 5 para calcular el contenido de $C_{biomasa}$ (Wu et al., 1990).

$$\frac{\text{mg } C_{biomasa}}{\text{kg ss}} = (C_T - C_{sol}) * 2.22 \quad (5)$$

Donde:

$C_{biomasa}$: Carbono presente en la biomasa (mg/kg ss)

C_T : Carbono orgánico soluble del suelo más carbono presente en la biomasa (mg/kg ss)

C_{sol} : Carbono orgánico soluble del suelo (mg/kg ss)

2.22: Factor propuesto por Wu et al. (1990)

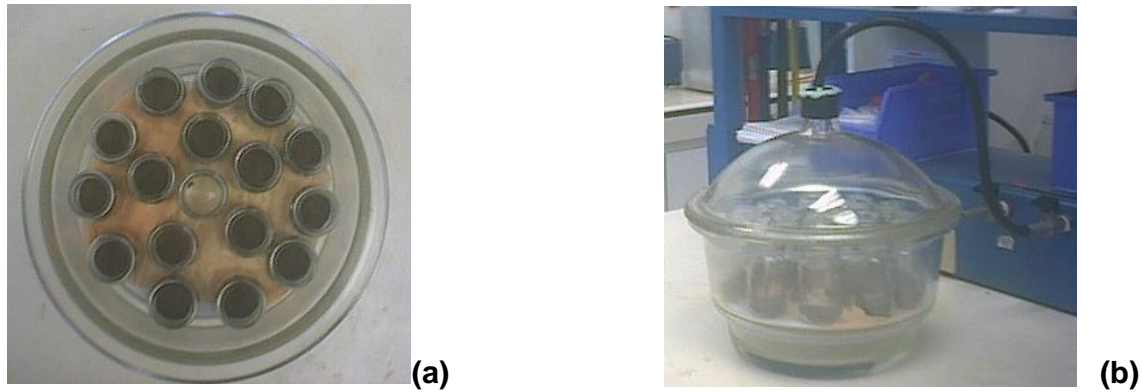


Figura 8. a) Muestras preparadas para la fumigación y b) fumigación de las muestras en presencia de cloroformo, con vacío

5.3.2.4 Cuantificación del NH_3 volatilizado

La cuantificación del NH_3 volatilizado de las muestras de suelo, se realizó mediante la valoración del H_3BO_3 que se introdujo en las jarras durante la incubación del suelo. La determinación se realizó de la siguiente manera: se empleó una alícuota de 5 ml de H_3BO_3 a la cual se le adicionaron 25 ml de agua destilada, para proceder a su titulación con H_2SO_4 0.0002 N hasta observar el vire de color morado a verde esmeralda (Yúfera y Carrasco, 1973).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dinámica de carbono: Producción de CO₂

La dinámica de producción de CO₂ fue muy similar en todos los suelos hasta el día 42 (Figura 9), de allí en adelante se mantuvo constante en los sitios LUCv y TU1Cs y TU2Cs. Al parecer la estabilización no se puede atribuir al sistema de labranza, ya que en los suelos de Tultengo se presentó con el sistema de conservación, mientras que en La Unión fue con el sistema convencional.

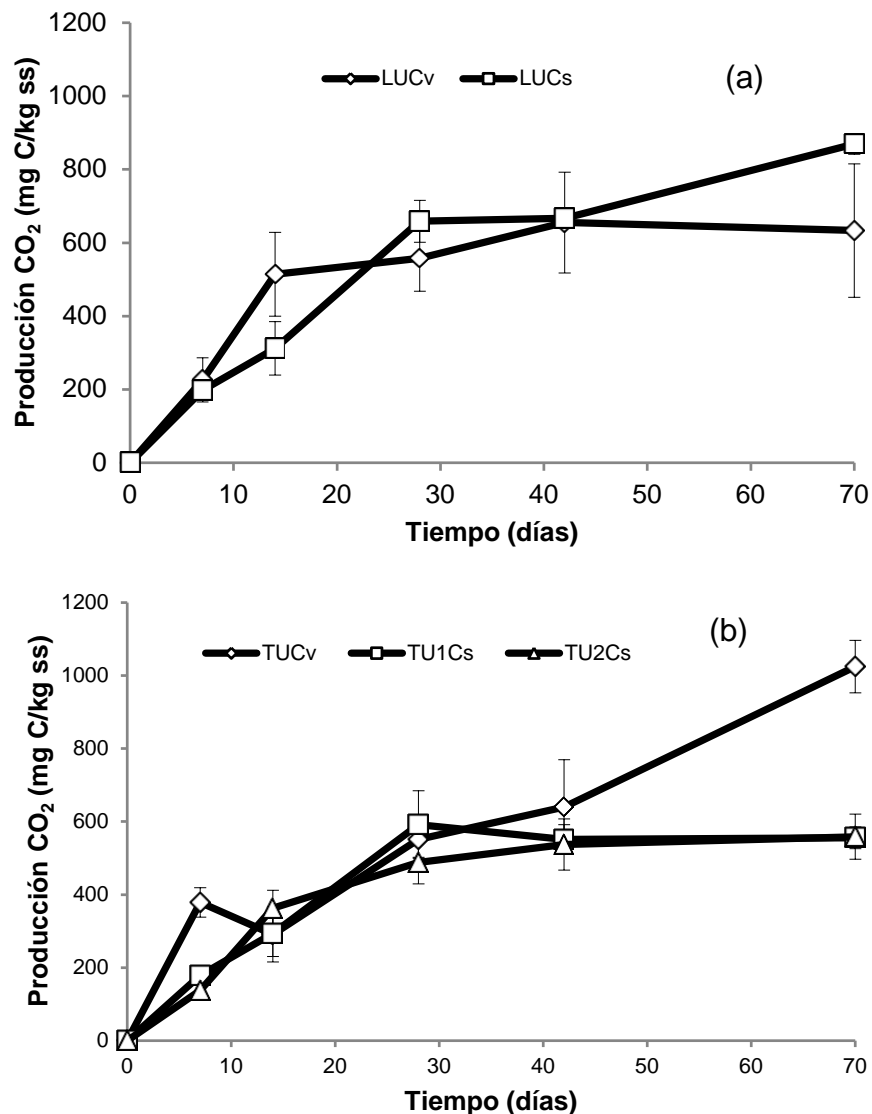


Figura 9. Producción de CO₂ en los suelos de estudio: a) La Unión y b) Tultengo. Las barras representan la desviación estándar (n=3), ss: suelo seco

Las tasas de producción de CO₂ en este estudio variaron entre 9 y 37 mg C-CO₂/kg ss/d en Tultengo y entre 8 y 26 mg C-CO₂/kg ss/d, mientras que Guerrero (2006) encontró tasas mayores (entre 22.4 y 65.7 mg C-CO₂/kg ss/d), lo que indica que en los suelos de esta investigación, el carbono orgánico se mineraliza más lentamente que en los suelos estudiados por Guerrero (2006), pese a presentar características fisicoquímicas similares.

En el cuadro 1 se observa que el contenido de materia orgánica es ligeramente superior en los suelos bajo labranza de conservación, lo que podría indicar que el sistema ha contribuido a mejorar este aspecto del suelo, toda vez que el aporte de materia orgánica que se hace con los residuos es muy similar en todos los suelos. Sin embargo, el incremento es sólo igual 0.8% en Tultengo y a 0.3% en La Unión. Según López et al. (2003) es común encontrar incrementos muy bajos en el contenido de materia orgánica en regiones semiáridas donde se adopta el sistema conservacionista, debido a la baja producción de residuos por la escasez de agua y a las prácticas agrícolas inadecuadas. Lo anterior aplica para los tres sitios de estudio, donde se siembra cebada; cuyo rastrojo es muy liviano y por lo tanto fácilmente transportado por los vientos que se presentan en la zona. Por ello, los productores dejan tallos muy cortos, de aproximadamente 10 cm de altura, lo que significa un aporte pobre de materia orgánica.

Otra razón por la que la velocidad de mineralización de los residuos es muy similar con ambos sistemas puede ser la relación C/N de dichos residuos. El rastrojo de la cebada tiene una relación C/N de 90 (Navarro, 2000), lo que hace necesaria la adición externa de nitrógeno para su mineralización. Sin embargo, por ser la cebada un cultivo poco exigente y por la escasez de agua en la zona (que provoca la formación de costras con la adición de fertilizantes), los productores no lo fertilizan. Patiño-Zúñiga et al. (2009) compararon ambos sistemas de labranza en la zona semiárida de El Batán, Edo. de México sin encontrar diferencias en la dinámica de producción de CO₂. Las diferencias que ellos reportan se refieren a días específicos, como sucede en este estudio (i.e. en los suelos de La Unión la emisión de CO₂ es 1.1 y 1.7 veces mayor en los días 7 y 14, respectivamente en el sistema convencional con respecto al conservacionista), sin embargo esto no significa que la dinámica en general se comporte de la mismamaneira el resto del tiempo). Guerrero (2006), quien realizó un estudio similar en suelos cebaderos de Tolcayuca, Hgo., tampoco encontró diferencias en las dinámicas de carbono por efecto del sistema de labranza.

También existen ciertas características del sistema conservacionista que limitan la mineralización de la materia orgánica; al estar los residuos en la superficie, hay menor contacto con los microorganismos del suelo que podrían degradarlos. Además, la cubierta vegetal ayuda al suelo a retener mayor humedad y disminuir su temperatura, lo que hace más lentas la actividad metabólica de la biomasa y la velocidad de las reacciones químicas (Lal et al., 1990). Las condiciones anteriores se presentaban en los suelos de

estudio bajo labranza de conservación, donde la humedad era mayor que en los suelos control.

Dadas las explicaciones anteriores, podría pensarse que los tres sitios de estudio están actuando como reservorios de carbono con ambos sistemas de labranza, debido a que su mineralización está limitada por la deficiencia de N_i en ambos sistemas y posiblemente por las condiciones de mayor humedad bajo las que se encuentran los suelos con labranza de conservación, principalmente en Tultengo.

Dinámica de nitrógeno: Volatilización de NH_3 y producción de NH_4^+ , NO_2^- y NO_3^-

En la figura 10 se observa que en general, las pérdidas de N en forma de NH_3 fueron menores a 5 mg/kg ss durante la incubación. Lo anterior puede atribuirse al pH neutro de los suelos y a la humedad a la que se realizó la incubación (60% de la CRA), condiciones que favorecen el proceso de amonificación y limitan la volatilización de NH_3 (López et al., 2003).

El incremento que se observó en los primeros siete días se debe a que se partió de una producción inicial nula, ya que se asume que al tiempo cero no hay producción de NH_3 . Posteriormente, a partir del día 14 la volatilización se mantuvo prácticamente constante en todos los suelos, con valores menores a 2 mg/kg ss, lo que indica que la mineralización del N no fue limitada en esta etapa del ciclo del nitrógeno. La cantidad volatilizada de NH_3 en los suelos de este experimento fue menor que la que presentaron los suelos en el estudio de Guerrero (2006), donde la volatilización se estabilizó en valores entre 5 y 7 mg N- NH_3 /kg ss.

Los factores que influyen en el proceso de volatilización del NH_3 en el suelo son el pH, la humedad y la temperatura. Es indispensable que haya un pH mayor a 6.3 para que existan suficientes protones en el medio para que suceda la amonificación. Una vez formado el NH_4^+ , será más fácilmente retenido por el complejo de cambio del suelo por ser un catión. La humedad y la temperatura son importantes porque repercuten en todas las transformaciones, ya sean de naturaleza química o biológica.

Cuando el NH_3 no puede escapar fácilmente del suelo y se acumula, puede ocasionar efectos fitotóxicos, por ello es importante que el suelo tenga las condiciones de pH, temperatura y humedad, además de una buena porosidad para que su producción sea pequeña y que su salida no se vea impedida.

Por último, es importante mencionar que tampoco en este parámetro se observó un efecto como consecuencia del sistema de labranza.

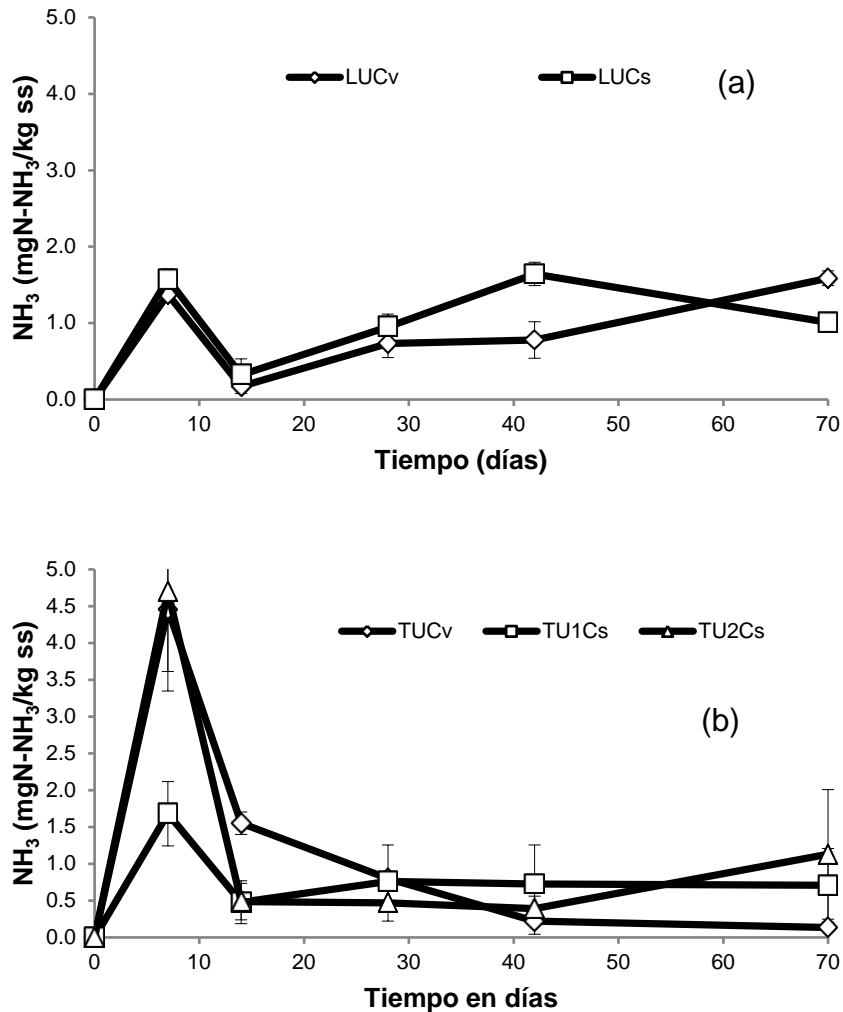


Figura 10. Volatilización de NH₃ en los suelos de estudio: a) La Unión y b) Tultengo. Las barras representan la desviación estándar (n=3), ss: suelo seco

En la figura 11 se muestra la dinámica de producción de NH₄⁺ en los suelos, en la que se puede apreciar que las cantidades producidas, así como las variaciones que se presentaron, generalmente fueron menores a 4 mg/kg ss durante toda la incubación. Las concentraciones anteriores son muy similares a las que se presentaron en el estudio de Guerrero (2006) y menores a las reportadas por Patiño-Zúñiga et al. (2009) las cuales variaron entre 8.5 y 11.2 mg N-NH₄⁺/kg ss. Lo anterior se explica por el bajo contenido de nitrógeno de los suelos. El incremento que se presentó en los primeros siete días pudo deberse al ajuste de humedad de los suelos, condición que propició un aumento en la actividad biológica. Al igual que la volatilización de NH₃, la producción de NH₄⁺ tampoco presentó un comportamiento distinto en función del sistema de labranza.

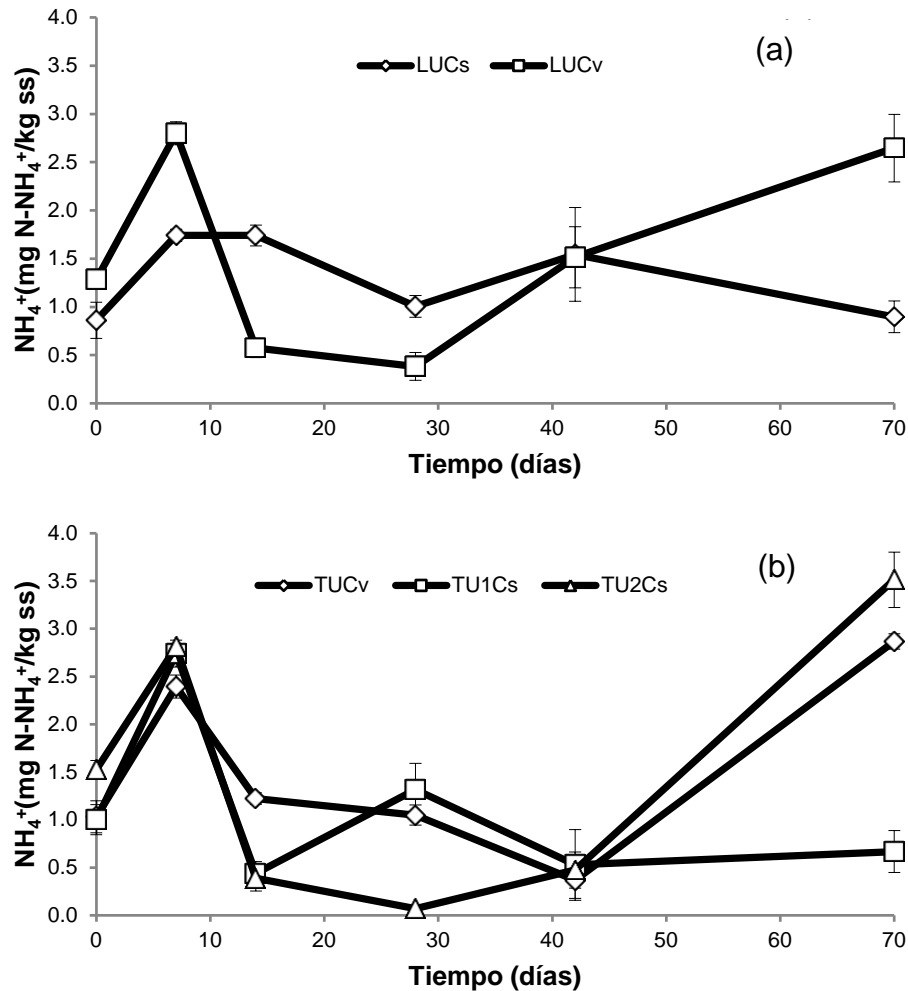


Figura 11. Producción de NH_4^+ en los suelos de estudio: a) La Unión y b) Tultengo. Las barras representan la desviación estándar (n=3), ss: suelo seco

En la figura 12 se muestra la dinámica de la producción de NO_2^- , donde se puede apreciar que estos iones fueron el producto minoritario dentro del ciclo del nitrógeno en los suelos. Los NO_2^- son el resultado de la oxidación del NH_4^+ (amonificación) y posteriormente son oxidados para producir NO_3^- . Esta última transformación es mucho más rápida que la primera, por lo que es común encontrar concentraciones muy pequeñas de NO_2^- en suelos bien aireados y con pH cercano a la neutralidad. Por lo tanto, las concentraciones cuantificadas durante el experimento indican que se mantuvieron las condiciones necesarias para el proceso de nitrificación durante la incubación, lo cual es benéfico para la nutrición de las plantas, ya que los NO_3^- son una de las formas en que es asimilado el nitrógeno.

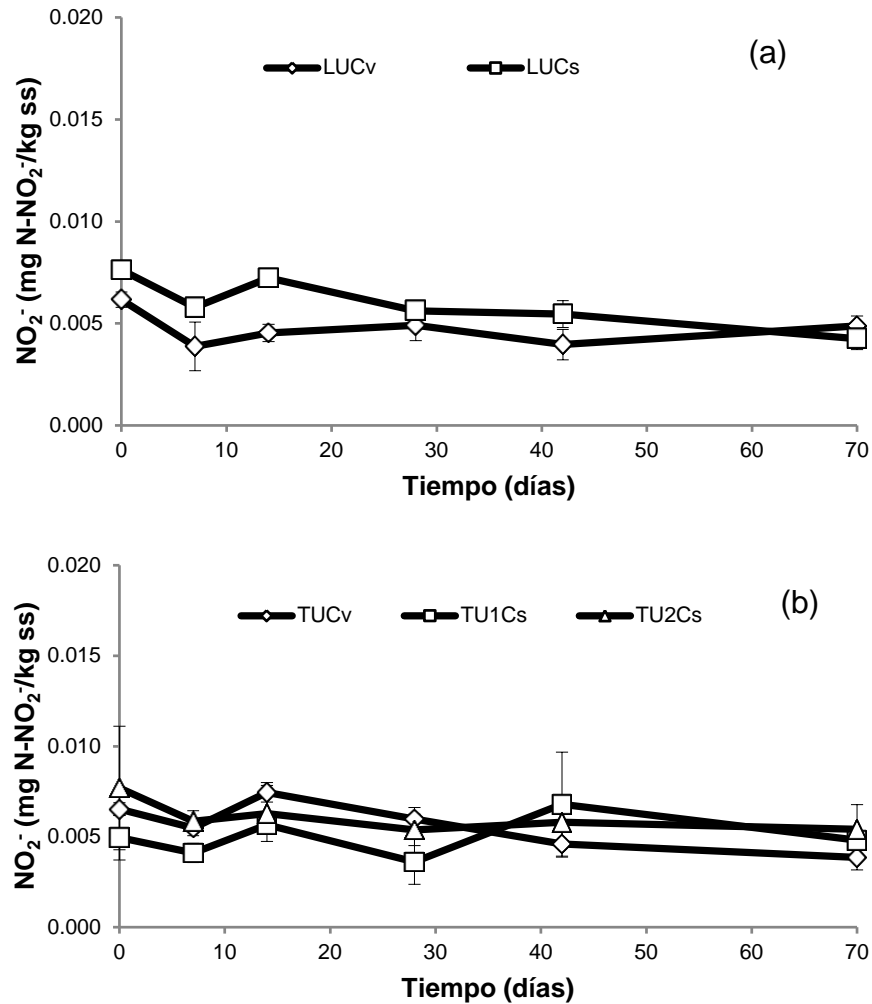


Figura 12. Producción de NO_2^- en los suelos de estudio: a) La Unión y b) Tultengo. Las barras representan la desviación estándar (n=3),ss: suelo seco

La figura 13 muestra la dinámica de producción de NO_3^- durante la incubación, en donde se puede observar que la producción tiende a disminuir en todos los suelos con respecto al tiempo, independientemente del sistema de labranza, y además, las cantidades producidas son pequeñas (menores a 2 mg N- NO_3^- /kg ss). Patiño-Zúñiga et al. (2009) reportó concentraciones ligeramente mayores (2.24-2.89mg N- NO_3^- /kg ss) en los suelos con remoción parcial o total de los residuos y concentraciones 1.6 veces mayores en los suelos en los con retención total de los residuos. Es importante tomar en cuenta que en el estudio de Patiño-Zúñiga et al. (2009), los suelos fueron fertilizados y los tratamientos en campo se realizaron en una parcela experimental, a diferencia de la presente investigación, donde los suelos no fueron fertilizados y el manejo de los sistemas de labranza no era controlado por el investigador

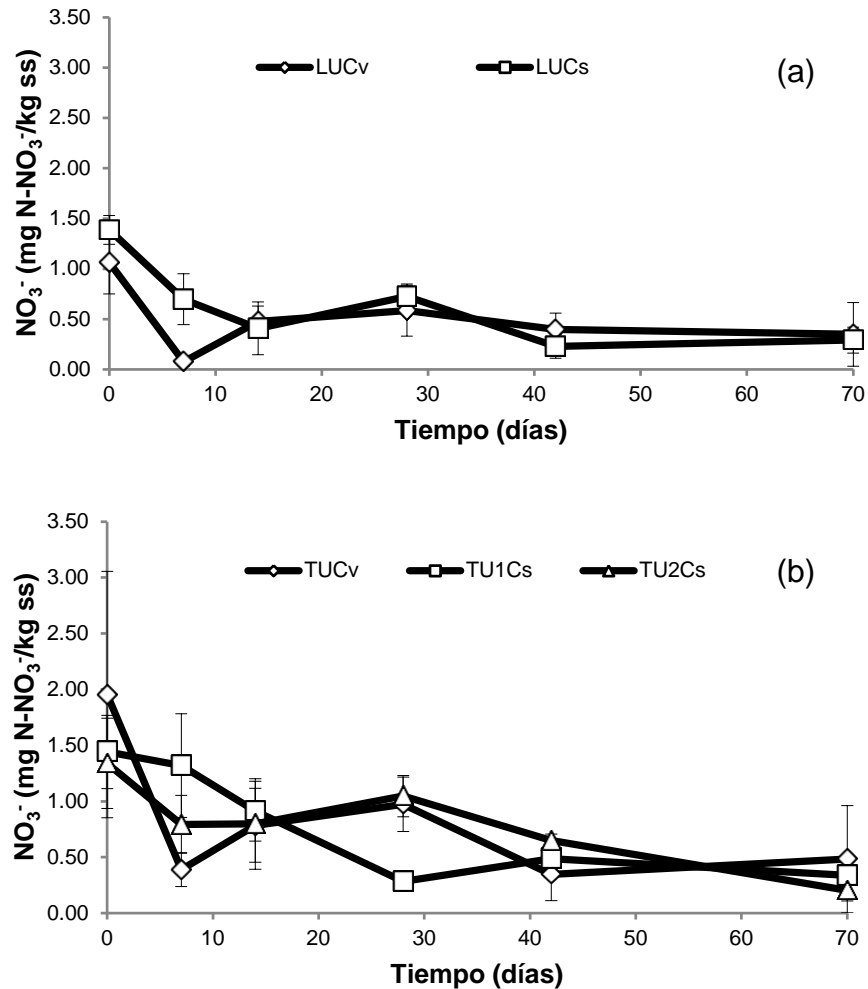


Figura 13. Producción de NO_3^- en los suelos de estudio: a) La Unión y b) Tultengo. Las barras representan la desviación estándar ($n=3$), ss: suelo seco

El comportamiento observado en las dinámicas de NH_3 , NH_4^+ , NO_2^- y NO_3^- , indica que los suelos presentan las condiciones requeridas para que se realice la nitrificación, por lo que la disminución paulatina en la producción de NO_3^- indica que están siendo consumidos por los microorganismos del suelo. Si existieran plantas en ese momento en los suelos de estudio, los microorganismos competirían con ellas por el nitrógeno disponible en el suelo. Por lo anterior, es recomendable que se adicione nitrógeno de manera exógena para cubrir esta deficiencia. Un criterio para ajustar la concentración de nitrógeno en los suelos, sería lograr una relación C/N igual a 10. Los suelos de estudio presentaron una relación C/N entre 16 y 17.9, por lo que para lograr que la relación de 10, sería necesario adicionar entre 13 y 15 kg N/ha de suelo, si el nitrógeno se adicionara en forma de urea (con una concentración de 46% de nitrógeno y una eficiencia de 60%), las cantidades necesarias variarían entre 47.1 y 54.3 kg urea/ha suelo.

Dinámica de la población microbiana: $C_{biomasa}$

La figura 14 muestra la dinámica de la población microbiana, medida mediante la cuantificación de $C_{biomasa}$. La población tendió a aumentar durante la incubación, lo cual es explicable, ya que se proporcionó la humedad óptima para su actividad y las dinámicas de carbono y nitrógeno evidenciaron actividad degradadora. En el estudio de Guerrero (2006) la biomasa presentó un comportamiento opuesto, el cual se atribuyó a una posible adaptación a las condiciones de incubación. Este estudio al igual que el de Guerrero (2006) tuvo una duración de 70 días y en ninguno de ellos se observó la estabilización de la biomasa microbiana, por lo que sería recomendable realizar un experimento de mayor duración para determinar lo anterior, así como para saber si se presenta alguna diferencia como respuesta al sistema de labranza.

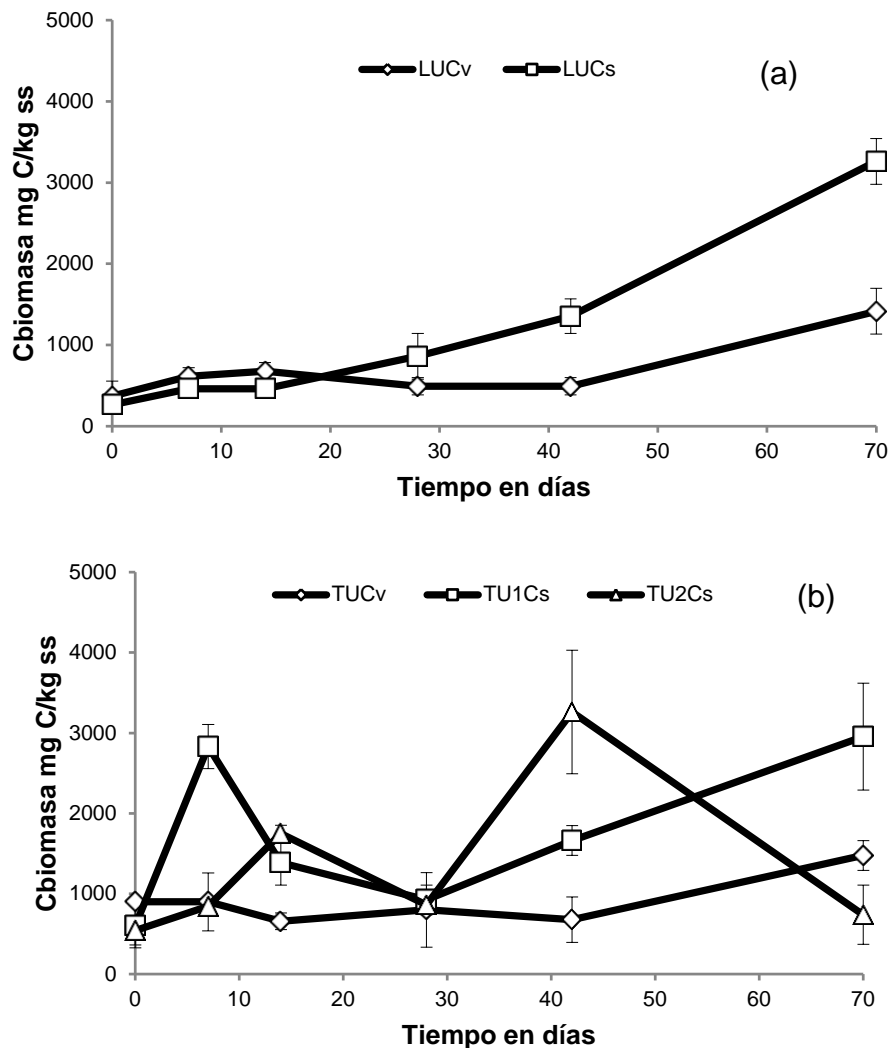


Figura 14. Dinámica de la población microbiana en los suelos de estudio: a) La Unión y b) Tultengo. Las barras representan la desviación estándar (n=3), ss: suelo seco

La disminución pronunciada de la biomasa que se observó en el día 70 en el suelo TU2Cs, se puede atribuir a un error en el manejo de la muestra para su análisis, desafortunadamente, por la naturaleza del experimento y de la misma determinación, no fue posible repetir la cuantificación.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Los suelos presentaron una población microbiana activa y las condiciones adecuadas para la mineralización del carbono orgánico y para la nitrificación. Sin embargo, el nitrógeno disponible es un factor limitante. Esta condición no permitió evaluar el efecto del sistema de labranza, sin embargo, sí reflejó lo que ocurre bajo las condiciones de campo. Por ello, con base en los resultados se puede decir que los suelos evaluados se comportarán como sumideros de carbono mientras se mantengan bajo las condiciones estudiadas. Para eliminar el papel limitante del nitrógeno se recomienda realizar un estudio en el que se adicione este elemento en cantidad suficiente para lograr una relación C/N igual a 10 en los suelos y de esta manera determinar el efecto del sistema de labranza. Así mismo, es importante evaluar la emisión de otros gases con efecto invernadero como el óxido nitroso (N_2O) y el metano (CH_4).

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- ASAE. (1982). *Terminology and definitions for soil tillage and soil-tool relationships. Agricultural Engineers Yearbook*. St. Joshep: ASAE.
- Beltrán-Hernández, R., Lucho-Constantino, C., López-Contreras, E., Jaimez-Ordaz, J., & Vázquez-Rodríguez, G. (2005). *Impacto de los sistemas de cultivo sobre la calidad de los suelos y de los productos agrícolas*. Pachuca: SIZA-CONACYT.
- Beltrán-Hertnández, R., Luna-Guido, M., Ríos, G., & Dendooven, L. (1999). Carbon and nitrogen dynamics in alkaline saline soil of the former Lake Texcoco (Mexico) as affected by application of sewage sludge. *European Journal of Soil Science*, 50, 601-610.
- Bloggs, J. (2000). *Manual de prácticas de suelo. Boletín informativo*. Roma: FAO.
- Claveran, A., Fregoso, T., & Sánchez, B. (2001). *La labranza conservacionista en México*. Madrid: I World Congress on Conservation Agriculture, 1-5 de octubre.
- CONABIO. (2008). *Los llanos de Apan*. México: CONABIO.
- Diario Oficial de la Federación. (2000). *NOM-021-SEMARNAT-2000. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreos y análisis*.
- FAO. (1992). *Manual de sistemas de labranza para Latinoamérica. Boletín de suelos*. Argentina. Págs. 87: FAO.
- FAO. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la Tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos*. Roma: FAO.
- FAO, & MAGK. (2008). *Agricultura de conservación para pequeños agricultores en zonas de secano, Distrito de Laikipia, Kenya*. Roma: FAO.
- Guerrero, C. (2006). *Dinámicas de carbono y nitrógeno en suelos bajo labranza de conservación y labranza convencional en Tolcayuca, Hidalgo*. Pachuca, Hgo.: Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Henry, G., & Heinke, W. (1999). *Ingeniería ambiental*. México: Pearson.
- INAFED. (2005). *Tlaxcala*. México: INAFED.
- IPCC. (2001). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Lal, R. (1999). *Global carbon pools and fluxes and the impact of agricultural intensification and judicious land use. In: Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable manageme.* Rome: World Soil Resources Report 86. FAO.
- Lal, R., Eckert, D., Fausey, N., & Edwards, W. (1990). Conservation tillage in agriculture. En *Agricultural Systems* (pág. 225). Iowa: Soil and Water Conservation Society.
- Leroux, M. (2005). Greenhouse effect-water effect. Chapter 5. En L. M., *Global warming - Myth or reality? Te erring ways of climatology* (págs. 79-97). Berlin: Springer.
- Lokupitiya, E., & Pautian, K. (2006). Agricultural soil greenhouse gas emissions: a review of National Inventory Methods. *Journal of Environmental Quality*, 35:1413-1427.
- López, M., Moret, D., Gracia, R., & Arrúe, J. (2003). Tillage effects on barely residue cover during follow in semiarid Aragon. *Soil and Tillage Research*, 72, 53-64.
- López, R., & López, M. (1978). *Ei diagnóstico de suelos y plantas. Métodos de campo y de laboratorio.* Madrid. Págs. 237.: Mundi-Prensa.
- Luna-Guido, M., Beltrán-Hernández, R., Solis-Ceballos, N., Hernández-Chávez, N., Mercado-García, F., Catt, J., y otros. (2000). Chemical and biological characteristics of alkaline soil from the former Lake Texcoco as affected by artificial drainage. *Biology and Fertility of Soil*, 32, 102-108.
- Manahan, E. (1994). *Environmental Chemistry.* Boca Raton: Lewis Publishers.
- Middleton, N., & Thomas, D. (1997). *World atlas of desertification. 2nd edition.* Minnesota: UNEP. Págs. 182.
- Navarro, B. A. (2000). *Manual práctico de labranza de conservación.* México: Colegio de Postgraduados. págs. XX.
- Novelo, G. (2000). *La labranza de conservación en México y apoyos FIRA para su adopción. Folleto.* Morelia: FIRA.
- Patiño-Zúñiga, L., Ceja Navarro, J., Govaerts, B., Luna-Guido, M., Sayre, K., & Dendooven, L. (2009). The effects of different tillage and residue management practices on soil characteristics, inorganic N dynamics and emission of N₂O, CO₂, and CH₄ in the central highlands of Mexico: a laboratory study. *Plant Soil*, 231-241.
- Porta, C., López-Acevedo, R., & Roquero, d. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente.* Madrid. Págs. 849.: Mundi-Prensa.
- Sayre, K., & Govaerts, B. (2007). Conserving soils while producing wheat. En J. Dixon, H. Braun, & P. Kosina, *Wheat Facts and Futures* (pág. 130). México: CIMMYT.

- Tamames, R. (2002). *Agricultura de conservación, un enfoque global*. Madrid: Mundi-Prensa. Págs. 207.
- Villa, R. R. (1998). *Labranza del suelo. Publicación docente No. 4*. Chile: Universidad de Chile.
- Wu, J., Joergensen, R., Pommerening, B., Chaussod, R., & Brookers, P. (1990). Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction an automated procedure. *Soil Biology and Biochemistry*, 22, 1167-1169.
- Yúfera, P., & Carrasco, D. (1973). *Química Agrícola*. Madrid: Alhambra.

ANEXO

A.1. TÉCNICA DE EXTRACCIÓN DEL NITRÓGENO INORGÁNICO (Beltrán-Hertrández et al., 1999)

Procedimiento:

- 1.- Se pesan 40g de suelo, se pasan a un frasco de 250 ml y se añaden 120 ml de K_2SO_4 0.5M.
- 2.- Se tapa el frasco y se agita a 180 rpm durante 30 minutos, en un agitador mecánico.
- 3.- Se deja reposar la suspensión durante cinco minutos.
- 4.- Se filtra el líquido sobrenadante a través de un papel de filtro (Whatman núm. 42 o Schleider y Schull número 597). Si la primera porción de filtrado está turbia se vuelve a filtrar a través del mismo papel, recogiendo el filtrado en un vaso limpio.

Este procedimiento se realizó para extraer las formas inorgánicas de nitrógeno (NO_2^- , NO_3^- y NH_4^+) y el C soluble del suelo. El extracto obtenido con esta técnica es el que se usa en las siguientes determinaciones.

A.2. DETERMINACIÓN DE N- NO_2^- EN SUELO (Yúfera y Carrasco, 1973)

Fundamento:

Los nitritos se extraen del suelo con solución acuosa saturada de K_2SO_4 y se valoran colorimétricamente por diazotación con ácido sulfanílico y copulación del compuesto obtenido con alfa-naftilamina.

Procedimiento:

- 1.- Se toman 10 ml del extracto de suelo, se pasa a un matraz aforado de 50 ml y se le añade agua destilada hasta unos 35 ml.

- 2.- Se añade 1 ml de la solución de ácido sulfanílico, a cada matraz aforado y se agita bien.
- 3.- Se añade 1 ml de la solución de alfa-naftilamina, a cada matraz aforado y se agita bien para aforar a 50 ml con H₂O destilada.
- 4.- Se dejan pasar diez minutos y después se mide la absorción óptica de cada solución a 520 nm.
- 5.- Se calcula el contenido de NO₂⁻ de la muestra, mediante una gráfica patrón, trazada a partir de las absorbancias de las soluciones patrones, teniendo en cuenta que para la colorimetría se tomaron 10 ml del extracto obtenido a partir de 40 g de suelo.

A.3. DETERMINACIÓN DE N-NO₃⁻ DEL SUELO (Yúfera y Carrasco, 1973)

Procedimiento:

- 1.- Se toman 10 ml del extracto, se pasan un matraz aforado de 100 ml.
- 2.- Se evapora a sequedad la muestra en una estufa.
- 3.- Se mezcla el residuo perfectamente con 2 ml de ácido fenildisulfónico, para asegurar la disolución de todos los sólidos. Si se necesita, se calienta suavemente en baño maría para disolver todo el residuo.
- 4.- Se diluye con 20 ml de agua destilada y se agregan, con agitación, unos 6 ó 7 ml de NH₄OH o unos 5 o 6 ml de KOH, hasta que se desarrolle el color máximo (amarillo), posteriormente se afora a 100 ml con H₂O destilada.
- 5.- Se mide la absorción óptica de cada solución a 410 nm.
- 6.- Se calcula el contenido de NO₃⁻ de la muestra, mediante una gráfica patrón, trazada a partir de las absorbancias de las soluciones patrones, teniendo en cuenta que para la colorimetría se tomaron 10 ml del extracto obtenido a partir de 40 g de suelo.

A.5. DETERMINACIÓN DE N-NH₄⁺ DEL SUELO (NOM-021-SEMARNAT-2000)

Procedimiento:

- 1.- Se toman 10 ml del extracto del suelo y se colocan en un tubo de destilación.
- 2.- Se le agrega MgO seguido de 90 ml de agua destilada.
- 3.- Aparte en un matraz erlenmeyer de 125 ml se colocan 10 ml de H₃BO₃ con indicador mezclado (rojo de metilo y azul de metileno).
- 4.- Se conecta el matraz erlenmeyer en el tubo de salida del refrigerante, de modo que este quede en contacto directo con el líquido.
- 5.- Conectar el aparato de destilación hasta completar aproximadamente 50ml en 3 o 4 minutos.
- 6.- Al término de la destilación se titula la muestra de H₃BO₃, junto con los blancos (se preparan de forma similar a las muestras) con H₂SO₄ 0.001M.

A.6. DETERMINACIÓN DE N PRESENTE EN LA BIOMASA (N_{biomasa}) (Luna-Guido *et al*, 2002)

Se realiza el proceso de fumigación-incubación y fumigación-extracción como se explicó en el apartado 4.4.2.3. Posteriormente, se lleva a cabo el procedimiento de extracción (ver técnica A.1.) a la muestra fumigada y se trabaja con el extracto aplicando las técnicas A.2, A.3 y A.4. Finalmente, se suma el N presente en cada una de estas formas y se resta de la suma obtenida en las muestras no fumigadas.

A.7. DETERMINACIÓN DE C_{sol} EN EL SUELO ((NOM-021-SEMARNAT-2000)

Fundamento:

Este método se basa en la oxidación del C_{sol} del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con el

H_2SO_4 presente en el medio, al igual que el H_3PO_4 para evitar interferencias de Fe^{3+} y el dicromato de potasio residual, es valorado con sulfato ferroso amoniacal (FeSO_4), con este procedimiento se detecta un 70 y 84 % del $\text{C}_{\text{sol}}^{\text{total}}$.

Procedimiento

- 1.- Se toman 10 ml del extracto de suelo y se colocan en un matraz de cuello esmerilado.
- 2.- Posteriormente se adicionaron 5 ml de Dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 0.4 N, 15 ml de una mezcla de ácidos en proporciones 2:1:2 (H_2SO_4 , H_3PO_4 , H_2O) y 1 ml de óxido de mercurio (70 $\mu\text{g}/\text{ml}$).
- 3.- Se conecta el cuello del matraz al refrigerante y se inicia la digestión, la cual se prolonga durante 2 horas.
- 4.- Se deja enfriar la muestra y se prosigue a una titulación con la disolución de sulfato ferroso amoniacal ($\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$) 0.4N, y difenilamina como indicador, gota a gota hasta un punto final de verde claro.