

CAPTURA DE CARBONO EN LOS SUELOS PARA UN MEJOR MANEJO DE LA TIERRA



CAPTURA DE CARBONO EN LOS SUELOS PARA UN MEJOR MANEJO DE LA TIERRA

basado en el trabajo de
Michel Robert
Institut national de recherche agronomique
París, Francia

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, juicio alguno sobre la condición jurídica de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

ISBN 92-5-304690-2

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión de material contenido en este producto informativo para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización escrita de los titulares de los derechos de autor, siempre que se especifique claramente la fuente. Se prohíbe la reproducción del material contenido en este producto informativo para reventa u otros fines comerciales sin previa autorización escrita de los titulares de los derechos de autor. Las peticiones para obtener tal autorización deberán dirigirse al Jefe del Servicio de Publicaciones y Multimedia de la Dirección de Información de la FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Roma, Italia, o por correo electrónico a copyright@fao.org

© FAO 2002

Prefacio

El Protocolo de Kyoto reconoce que las emisiones netas de carbono pueden ser reducidas ya sea disminuyendo la tasa a la cual se emiten a la atmósfera los gases de invernadero o incrementando la tasa por la cual esos gases son retirados de la atmósfera gracias a los sumideros. Los suelos agrícolas están entre los mayores depósitos de carbono del planeta y tienen potencial para expandir el secuestro de carbono y de esta manera mitigar la creciente concentración atmosférica de CO₂. Dentro del contexto del Protocolo de Kyoto y las subsiguientes discusiones de la Conferencia de las Partes (COP), hay un cierto número de características que hacen que el secuestro de carbono en las tierras agrícolas y forestales pueda ofrecer posibilidades de estrategias atractivas de modo de mitigar el incremento en la atmósfera de las concentraciones de gases de invernadero.

El Artículo 3.4 del protocolo de Kyoto parece permitir la expansión de los sumideros creados por la intervención humana. Los recientes acuerdos post-Kyoto consideran los sumideros en los países y reconocen el potencial fundamental de la agricultura, de las tierras de pastoreo y de los suelos forestales para capturar carbono y la necesidad de conceder créditos nacionales para favorecer la formación de sumideros de carbono en los suelos agrícolas.

Existen un cierto número de prácticas agrícolas que son conocidas por su estímulo a la acumulación adicional de carbono en el suelo con el consecuente mejoramiento de su fertilidad y efectos positivos sobre la productividad y el ambiente. Su contribución para el manejo del carbono por parte del hombre es probable que se incremente a medida que se conocen más detalles de sus características y que se apliquen nuevos enfoques, por ejemplo, la labranza de conservación.

Este trabajo se concentra sobre los suelos agrícolas como sumideros de carbono. El documento ha sido preparado con recursos de la FAO como contribución al programa FAO/FIDA sobre *Prevención de la Degradación de la Tierra, Fortalecimiento del Suelo y de la Biodiversidad de las Plantas y el Secuestro de Carbono por medio del Manejo Sostenible y el Cambio de Uso de la Tierra* (Prevention of Land Degradation, Enhancement of Soil and Plant Biodiversity and Carbon Sequestration through Sustainable Land Management and Land Use Change).

El objetivo de este programa está dirigido a la necesidad urgente de revertir el proceso de degradación del suelo debido a la deforestación y al uso y manejo inadecuados en las zonas tropicales y subtropicales. Se propone trabajar sobre este tema por medio de la promoción de los sistemas de un mejor uso y prácticas de manejo del suelo que proporcionen ganancias económicas y beneficios ambientales, mayor agrobiodiversidad, mejor conservación y manejo ambiental y un incremento de la captura del carbono. Este programa contribuirá al desarrollo de programas nacionales y regionales relacionando la Convención sobre el Cambio Climático (CCC)-Protocolo de Kyoto, la Convención para el Combate de la Desertificación (CCD) y la Convención sobre Biodiversidad (CBD), enfatizando el aspecto sinérgico entre las tres Convenciones.

Esta publicación presenta una valiosa revisión de distintas prácticas de manejo del suelo que podrían producir efectos positivos para incrementar la producción así como también los depósitos

de carbono en los suelos agrícolas y forestales que pudieran dar créditos dirigidos a satisfacer las metas nacionales de emisión de gases. Esto podría contribuir en forma significativa a los futuros debates sobre el uso sostenible del suelo y la mitigación del cambio climático.

Es de esperar que este documento sea útil al Mecanismo de Desarrollo Limpio (CDM) y a las agencias de apoyo financiero, a los planificadores y a los administradores, al contribuir con información real sobre el potencial de los suelos para la captura de carbono de modo de apoyar las decisiones para los programas de investigación, de desarrollo y de inversiones en el sector de uso de tierras agrícolas y rurales dirigidos a mejorar el manejo de la tierra, controlando su degradación y deforestación.

Índice

PREFACIO	iii
ÍNDICE	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE CUADROS	viii
RESUMEN	ix
SIGLAS	xi
AGRADECIMIENTOS	xii
1. TENDENCIA GENERAL DE LA CAPTURA DE CARBONO EN EL SUELO	1
Carbono y materia orgánica en el suelo	1
El papel de los suelos en el ciclo del carbono	1
Dinámica del carbono orgánico en los suelos	2
El papel fundamental de la materia orgánica en los suelos	4
Manejo del carbono en tierras áridas y en áreas tropicales	5
Ecosistemas forestales: emisión de CO ₂ y captura de carbono en los suelos	6
Tierras de pastoreo: un gran potencial como sumidero de carbono	7
Tierras cultivadas: el papel de las prácticas agronómicas	7
2. LA EVALUACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DEL CARBONO EN EL SUELO Y LOS PRINCIPALES CAMBIOS	9
Medida de las existencias de carbono en el suelo	9
Evaluación del cambio en el almacenamiento	12
3. MANEJO DE LAS TIERRAS FORESTALES, DE PASTOREO Y CULTIVADAS PARA AUMENTAR LA CAPTURA DE CARBONO EN LOS SUELOS	17
Bosques	17
Tierras de pastoreo	19
Tierras cultivadas	20
Disminución de la pérdida de carbono	20
Incremento del ingreso de materia orgánica al suelo	24
4. LOS DIFERENTES ESCENARIOS DE LA CAPTURA DE CARBONO	27
Opciones de manejo de la tierra para la captura de carbono	27
Tierras cultivadas	27
Bosques	29
Pasturas y tierras de pastoreo	29
El área estimada y los balances de captura de carbono	29

5. PRINCIPALES CONSECUENCIAS E IMPACTO DE LA CAPTURA DE CARBONO	33
Calidad y fertilidad del suelo	33
Impactos ambientales	34
Biodiversidad y función biológica del suelo	35
Beneficios para los agricultores	36
Efectos del cambio climático	39
6. PROPUESTAS	41
¿Cuáles son las propuestas más válidas pra la captura de carbono?	41
¿Cuáles son las principales implicancias para la agricultura?	42
Las tierras cultivadas y el componente cultivos en los sistemas agroforestales	42
El proyecto FAO-FIDA y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (CDM)	43
Una propuesta para un sistema de supervisión de tierras para verificar la captura de carbono	44
¿Cuáles son las principales deficiencias?	45
Nuevos proyectos y perspectivas	46
Conclusión	46
REFERENCIAS	51
ANEXOS	
1. MAPA DEL CARBONO TOTAL EN LOS SUELOS	59
2. ARTÍCULOS 3.3 Y 3.4 DEL PROTOCOLO DE KYOTO	61

Lista de figuras

1. El ciclo terrestre del carbono: el carbono del suelo y el carbono global disponible.	1
2. Modelo de la dinámica del carbono en el suelo	3
3. Ubicaciones de la materia orgánica del suelo en la matriz del suelo	4
4. Existencias anuales estimadas del total de carbono del suelo (t C/ha) en bosques tropicales y templados	7
5. Evolución de la concentración de carbono en los suelos limosos entre 1928 y 1991 con o sin adición de abonos orgánicos (lugar experimental del INRA, <i>Las 42 parcelas</i> , Versailles, Francia)	12
6. Evolución del carbono en el experimento de conversión de tierras de pastoreo a tierra arable en Rothamsted Highfields, Gran Bretaña	13
7. Disminución del carbono orgánico del suelo después de la deforestación y el cultivo de maíz	13
8. Cambios simulados del total del carbono del suelo (0-20 cm profundidad) entre 1907 y 1990 para el Corn Belt central de los Estados Unidos de América	14
9. Manejo de la materia orgánica del suelo en la agricultura	21
10. Protección física de la Materia Orgánica del Suelo (Chenu, sin publicar) y desprotección por la labranza	22
11. Efectos de la labranza convencional y de la labranza cero sobre el contenido de la materia orgánica en el perfil del suelo	22
12. Relación entre el carbono orgánico y la capacidad de intercambio de cationes en suelos experimentales seleccionados	33
13. Organización jerárquica de la biodiversidad del suelo	35
14. Efecto del sistema anterior de labranza sobre el número de lombrices de tierra en varias fincas. Canterbury, Nueva Zelanda	36
15. Principales beneficios del manejo sostenible del carbono del suelo en varias escalas espaciales	37

Lista de cuadros

1. Degradación mundial de suelos en relación a los cuatro procesos principales de degradación	6
2. Contenido medio de carbono orgánico para algunas unidades de suelos FAO-UNESCO y unidades de suelos WRB	10
3. Total de existencias de carbono orgánico del suelo (COS) y contenido medio (kg C/m ²) en las principales Zonas Agroecológicas	11
4. Efectos de la deforestación sobre la escorrentía y la erosión del suelo	17
5. Área mundial de los suelos cultivados bajo labranza cero	23
6. Diferentes sistemas basados en los cultivos usados para incrementar la captura de carbono	25
7. Principales efectos de las prácticas de manejo o de uso de suelos sobre la captura de carbono (t C/ha/año). Zonas áridas y tropicales	27
8. Potencial de almacenamiento neto de carbono de actividades adicionales bajo el artículo 3.4 del protocolo de Kyoto	30

Resumen

La creciente preocupación sobre los efectos potencialmente desastrosos del calentamiento global en varias regiones del mundo se está enfrentando con la incapacidad de muchos países de reducir sus emisiones netas de gases de invernadero en la medida y en la extensión requeridas por el Protocolo de Kyoto. Las negociaciones dentro del protocolo de Kyoto han mostrado una tendencia a la ampliación de las varias opciones reconocidas para la compensación de las emisiones de gases de invernadero. Las ruedas de negociaciones en 2000 y 2001 han aumentado la posibilidad de que la captura de carbono en los suelos usados para la agricultura -dentro de los territorios nacionales o en ciertos grupos de países- puedan ser incluidos como un elemento en las existencias nacionales de carbono.

En el pasado había opiniones variadas respecto a si la captura de carbono en los suelos sería realista, práctica y una opción a largo plazo. En los últimos años, se ha acumulado evidencia en favor de esos aspectos. La mayoría de los suelos del mundo usados para la agricultura han sido esquilados de su materia orgánica después de muchos años de aplicación de sistemas convencionales de labranza manual o mecánica antes de cada siembra, en comparación con su situación bajo la cubierta vegetal natural. Sin embargo, se ha constatado que este proceso de degradación es reversible. En muchos de los predios de agricultores, en climas húmedos y subhúmedos y en cultivos bajo riego, el contenido de materia orgánica se ha incrementado rápidamente después de cambiar las prácticas de manejo de suelos hacia la agricultura de conservación, incluyendo la labranza cero, la 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. La medida del progreso de la captura de carbono en los suelos agrícolas es técnicamente posible, pero hasta el momento, raramente ha sido hecha más allá de niveles experimentales. Esto podría ser aplicado regional o globalmente sólo si las organizaciones regionales de suelos llevaran a cabo una supervisión sistemática del suelo por medio de una combinación de lugares permanentes de supervisión, lugares de muestreo bien distribuidos, combinados con la descripción del manejo de la tierra por parte de los agricultores y la teledetección de la cobertura del suelo.

Una vez que los nuevos procedimientos de manejo de la tierra han sido bien comprendidos, que se han aplicado por unos pocos años y que se dispone de las herramientas adecuadas, el sistema de uso de la tierra ha demostrado ser competitivo tal como se aprecia por su difusión en los países en los que ha sido introducido. Además de la captura de carbono, los beneficios incluyen mejores rendimientos y mayor seguridad alimentaria, especialmente en los años de sequías, menores costos y mejor distribución de las necesidades de mano de obra a lo largo del año. El sistema hasta ahora ha encontrado gran aceptación en más de 50 millones de hectáreas de tierras agrícolas, en países como Brasil, Paraguay, Argentina, Estados Unidos de América y Australia y ha sido validado en menor escala en Europa, África y en países como India y Nepal.

La captura de carbono en los suelos agrícolas por medio de la agricultura de conservación y otros métodos de mejor manejo de la tierra puede ser permanente siempre que los agricultores continúen usando esas prácticas. La agricultura de conservación se ha difundido donde los agricultores han apreciado sus beneficios a través de la experiencia.

Sin embargo, la transición hacia la agricultura de conservación no es espontánea ni gratuita. Los conocimientos convencionales de los beneficios de la labranza y la falta de conocimientos

de los daños que esta causa al sistema tienden a mantener la agricultura basada en la labranza. Durante los dos o tres años necesarios para la transición a la agricultura de conservación puede haber costos adicionales para la adquisición de algunas herramientas y equipos. La incidencia de las malezas, si bien disminuye rápidamente con el tiempo, puede hacer necesaria la aplicación de herbicidas en los primeros años y los rendimientos y la capacidad para recobrase de la sequía mejorarán gradualmente y en forma evidente después del primer o segundo año.

Los agricultores deberán comprender el nuevo sistema y las razones para las distintas prácticas y adaptarlas a sus necesidades y condiciones específicas. Los fondos para la captura de carbono que puedan obtenerse bajo alguno de los mecanismos del Protocolo de Kyoto serán fundamentales para difundir la aplicación de la agricultura de conservación en otras áreas y países. Esto puede ser hecho informando a los agricultores sobre el sistema, permitiendo a agricultores líderes experimentar con el mismo y adaptarlo y aplicarlo a sus condiciones específicas, proporcionando apoyo técnico y, cuando sea necesario, créditos o pequeñas donaciones para apoyar a los pioneros en esa actividad. Una vez que el sistema haya sido adaptado, demostrado y económicamente validado en los predios de los agricultores en una determinada área, podrá ser posible hacer contratos con los agricultores para la captura de carbono como una forma de estimular la rápida adopción de las prácticas recomendadas por la mayoría de los agricultores.

Las praderas también tienen un gran potencial de captura de carbono. Especialmente las tierras degradadas o sobrepastoreadas pueden ser restauradas a un nivel de mayor productividad aplicando algunas medidas como la siembra en fajas de leguminosas que cubran una pequeña parte del total de la superficie, fertilizando con fosfatos en las fajas y alternando el pastoreo con períodos de reposo de la tierra. El incremento de la productividad primaria inicia así un ciclo con una mejor cobertura y una mayor masa de raíces en el suelo, más bioporosidad y una tasa mayor de infiltración, reducción de la escorrentía y la erosión y más humedad disponible para la vegetación. Este proceso da lugar a un incremento importante de la materia orgánica estable en el suelo, incluso en las capas más profundas.

Como en el caso de la agricultura de conservación, el cambio de un uso que favorece la degradación de las tierras de pastoreo a un sistema sostenible y más productivo que captura carbono y ayuda a mejorar la seguridad alimentaria, no es automático ni gratuito. Los cambios duraderos y exitosos necesitan el apoyo de los usuarios de la tierra reunidos en asociaciones, un proceso de aprendizaje y algunas inversiones iniciales que, consideradas por unidad de superficie, son limitadas.

Una vez que la productividad de las tierras arables y de las tierras de pastoreo se ha incrementado y demuestra una mayor capacidad de recuperación de las sequías, se reduce la presión sobre las tierras forestales y mejora las posibilidades de su conservación o del manejo conservacionista de estos recursos. Estos últimos, incluyendo la cosecha para la producción de energía o de productos madereros durables, con la inmediata resiembra o rebrote, mantendrán esencialmente la materia orgánica del suelo del sistema forestal. En el caso de la reforestación o de la plantación de cultivos permanentes tales como la palma aceitera o el caucho sobre tierras previamente deforestadas, el contenido de materia orgánica, esquilado durante y después de la deforestación, se elevará gradualmente hasta alcanzar niveles similares a los que hay bajo el bosque.

El mejoramiento del manejo de la tierra y el control de la degradación y la deforestación son opciones triunfantes: son deseables para el alivio de la pobreza y para la sostenibilidad y, además, tales medidas también aumentan la captura de carbono en los suelos, haciendo de este modo que las inversiones en el sector agrícola y rural sean más beneficiosas para los agricultores.

Siglas

C	Carbono.
CBD	Convención sobre la Diversidad Biológica de las Naciones Unidas (United Nations Convention on Biological Diversity).
CCD	Convención para el Combate de la Desertificación de las Naciones Unidas (United Nations Convention to Combat Desertification).
CDM	Mecanismo para el Desarrollo Limpio (Clean Development Mechanism).
CIRAD	Centro de Cooperación Internacional sobre Investigación Agronómica para el Desarrollo (Francia). (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement).
CO ₂	Bióxido de carbono.
COP	Conferencia de las Partes (Conference of the Parties).
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Food and Agriculture Organization of the United Nations).
FCCC	Marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (United Nations Framework Convention on Climate Change).
GEF	Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM). (Global Environment Facility).
GHG	Gases de Invernadero. (Greenhouse gases).
GLASOD	Evaluación Global de la Degradación del Suelo (Global Assessment on Soil Degradation).
GM	Mecanismo Global (Global Mechanism).
GPS	Sistema Posicional Global (Global Positioning System).
ICRAF	Centro Internacional de Investigación en Agroforestería (International Centre for Research in Agro-Forestry).
IFAD	Fondo Internacional para el Desarrollo Agrícola (International Fund for Agricultural Development).
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change).
LULUCF	Uso de la Tierra, Cambio en el Uso de la Tierra y Forestación (Land Use, Land Use Change and Forestry).
SOM	Materia Orgánica del Suelo (Soil Organic Matter).
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (United Nations Environmental Programme).
WRB	Base Mundial de Referencia (World Reference Base).

Agradecimientos

Este estudio fue preparado por Michel Robert, Director de Investigaciones del INRA (Institut National de Recherche Agronomique), Francia, durante sus funciones como científico visitante en FAO/AGLL, en colaboración con J. Antoine y F. Nachtergaele.

El estudio tiene además contribuciones de J. Benites, R. Brinkman, R. Dudal y P. Koohafkan.

El Prof. Jules Pretty, Universidad de Essex, el Prof. Rattan Lai, Ohio State University, el Prof. A. Young, Universidad de East Anglia, el Dr. Niels Batjes, Centro Internacional de Referencia e Información de Suelos (ISRIC), el Dr. Mike Swift, Director, TSBF y el Grupo Interdepartamental de Trabajo de la FAO sobre el Clima, proporcionaron valiosos comentarios sobre el documento.

La edición en español fue preparada por Cadmo Rosell y su formatación fue hecha por Lynette Chalk.

Capítulo 1

Tendencia general de la captura de carbono en el suelo

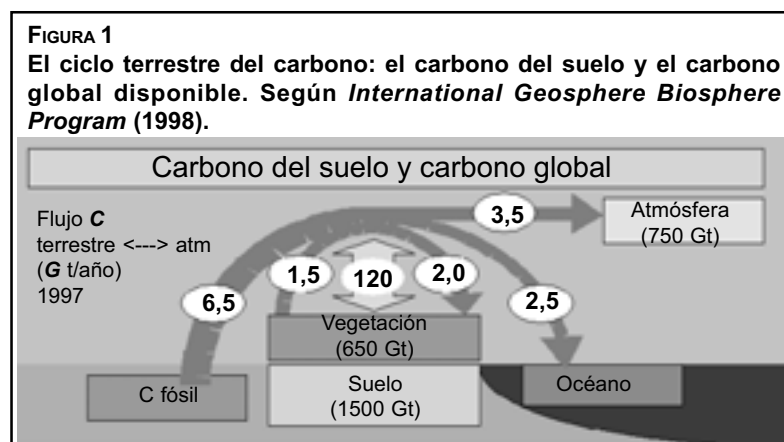
El incremento en la atmósfera de los llamados gases de invernadero (GHG) y el consecuente cambio climático tendrán efectos importantes en el siglo XXI. Si bien los escenarios exactos todavía son inciertos, son de esperar serios efectos negativos -aunque se esperan también algunos efectos positivos- por lo que es esencial que sean tomadas un cierto número de medidas para reducir las emisiones de gases de invernadero y para incrementar su captura en los suelos y en la biomasa. Para ello, deben ser desarrolladas nuevas estrategias y políticas apropiadas para el manejo de la agricultura y los bosques. Una opción se basa en la captura de carbono en los suelos o en las biomásas terrestres, sobre todo en las tierras usadas para la agricultura o la forestación. A partir del Protocolo de Kyoto esto se conoce como *Uso de la Tierra, Cambio en el Uso de la Tierra y Forestación (LULUCF)* y concierne los artículos 1.3 y 1.4 del Protocolo (IPCC, 2000).

La toma de acción para la captura de carbono bajo el Protocolo de Kyoto u otro tratado post-Kyoto no solo estimulará cambios importantes en el manejo del suelo sino que también, por medio de un incremento en el contenido de materia orgánica tendrá efectos significativos directos en sus propiedades y un impacto positivo sobre las cualidades ambientales o agrícolas y sobre la biodiversidad. Las consecuencias incluirán una mayor fertilidad del suelo y productividad de la tierra para la producción de alimentos y para la seguridad alimentaria. Esta herramienta económica también hará que las prácticas agrícolas sean más sostenibles y ayudará a prevenir o mitigar la degradación de los recursos de la tierra.

CARBONO Y MATERIA ORGÁNICA EN EL SUELO

El papel de los suelos en el ciclo del carbono

El ciclo terrestre del carbono se presenta en la Figura 1. En este ciclo, el carbono orgánico del suelo representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera y se estima en cerca de 1 500 Pg C a 1 m de profundidad (cerca de 2 456 a dos metros de profundidad)¹. El carbono inorgánico representa



¹ Pg = 10¹⁵ g = Gt = 10⁹ toneladas métricas

cerca de 1 700 Pg pero es capturado en formas más estables tales como el carbonato de calcio. La vegetación (650 Pg) y la atmósfera (750 Pg) almacenan considerablemente menos cantidades que los suelos.

Los flujos entre el carbono orgánico del suelo o terrestre y la atmósfera son importantes y pueden ser positivos bajo la forma de captura o negativos como emisión de CO₂.

Históricamente se han notado grandes variaciones. Houghton (1995) estima que las emisiones correspondientes al cambio de uso de la tierra -deforestación e incremento del pastoreo y de las tierras cultivadas- fueron cerca de 140 Pg entre 1850 y 1990 (de 0,4 Pg/año en 1850 a 1,7 Pg/año en 1990), con una liberación neta hacia la atmósfera de 25 Pg de carbono. De acuerdo con IPCC (2000), la pérdida histórica de los suelos agrícolas fue de 50 Pg de carbono en el último medio siglo, lo cual representa un tercio de la pérdida total del suelo y la vegetación.

En el pasado, el desarrollo de la agricultura fue la principal causa del incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera, pero hoy día, los mayores contribuyentes son la combustión de los combustibles fósiles por parte de la industria y el transporte (6,5 Pg/año). Un hecho importante, es que mientras la deforestación de muchas áreas tropicales produce emisiones de carbono estimadas en 1,5 Pg/año, al mismo tiempo se produce una acumulación en los ecosistemas terrestres de 1,8 a 2 Pg/año. Esto representa lo que es conocido como el *carbono faltante* en el ciclo: un sumidero que podría estar situado principalmente en la parte norte del hemisferio norte (Schindler, 1999). Los principales factores que actúan sobre la evolución de la materia orgánica conciernen la vegetación -ingreso de residuos, composición de las plantas-, los factores climáticos -condiciones de temperatura y humedad- y las propiedades del suelo -textura, contenido y mineralogía de la arcilla, acidez.

Otros factores relacionados con la fertilización del suelo (N, P o S) o con el riego, tienen efecto sobre la producción de las plantas y por lo tanto sobre el contenido de materia orgánica. La tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo depende sobre todo de la temperatura y de la disponibilidad de oxígeno -drenaje-, el uso de la tierra, los sistemas de cultivo, el manejo del suelo y de los cultivos (Lal *et al.*, 1995). En un tipo de suelo dado expuesto a prácticas constantes, se alcanza un casi-equilibrio -situación estable- de la materia orgánica del suelo después de 30 a 50 años (Greenland, 1995). En el contexto del combate del calentamiento global y del Protocolo de Kyoto, un punto importante es cómo crear en los suelos agrícolas de todo el mundo un sumidero de carbono bien cuantificado. Tal captura de carbono será relevante para los artículos 3.3 y 3.4 del Protocolo y también tendrá efectos positivos adicionales para la agricultura, el ambiente y la biodiversidad.

Dinámica del carbono orgánico en los suelos

Las existencias de carbono orgánico presente en los suelos naturales representan un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización) (Figura 2). En condiciones aeróbicas del suelo, gran parte del carbono que ingresa al mismo es lábil y sola una pequeña fracción (1%) del que ingresa (55 Pg/año) se acumula en la fracción húmica estable (0,4 Pg/año).

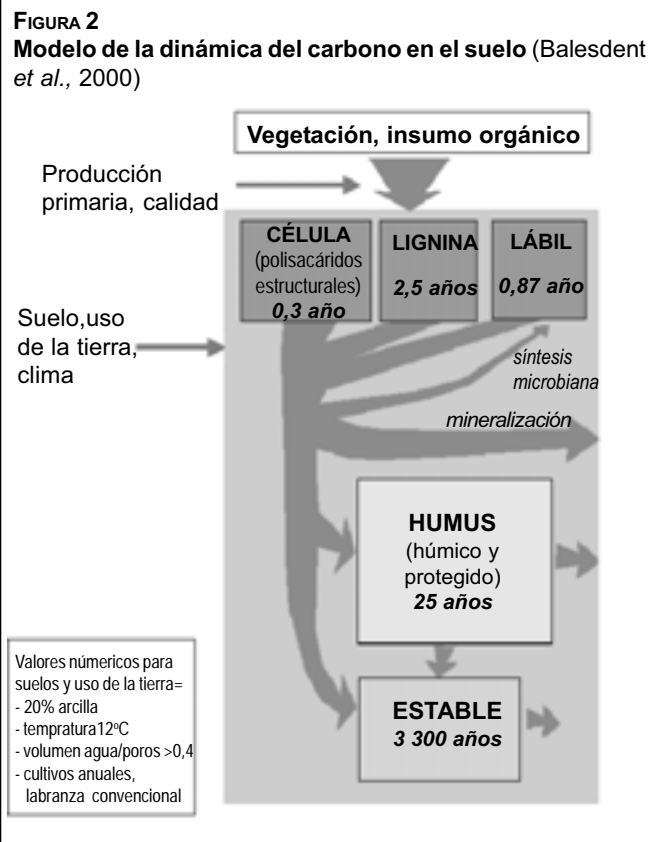
La materia orgánica del suelo tiene una composición muy compleja y heterogénea y está por lo general mezclada o asociada con los constituyentes minerales del suelo. Se han desarrollado un gran número de métodos de separación para identificar los distintos constituyentes de la materia orgánica del suelo, grupos cinéticos, p. ej. grupos que pueden ser

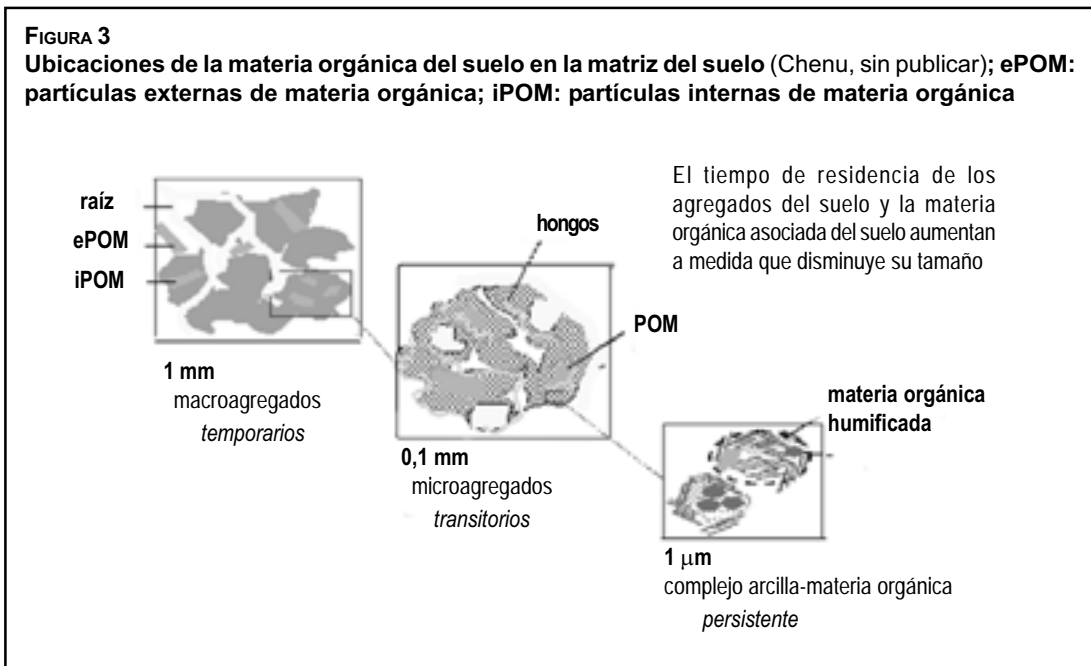
definidos por una cierta tasa de recambio del carbono. El sistema tradicional de separación en fracciones fúlvicas y húmicas no separa las fracciones con diferentes tasas de recambio (Balesdent, 1996) como se considera en los modelos. Los métodos de separación física tales como el fraccionamiento según el tamaño de las partículas, la densidad de las fracciones o las fracciones por tamaño de los agregados permiten la separación de fracciones cinéticas significativas (Feller, 1979; Balesdent, 1996). Entre estas fracciones, las partículas de materia orgánica son muy sensibles a los cambios en el uso de la tierra (Cambardella, 1998; Gregorich *et al.*, 1996). Existen algunos métodos directos para determinar la biomasa microbiana, la cual representa de uno a cinco por ciento del total de la materia orgánica del suelo y es una fuente

de reserva de nutrientes (N, P). Esta es una fracción muy lábil que fluctúa con la estación y que también responde rápidamente a los cambios de manejo del suelo. Los métodos de isótopos tales como el carbono 14 o la abundancia natural del carbono 13 son muy valiosos ya que permiten una estimación del tiempo de residencia de la materia orgánica y sus fracciones en el suelo. La abundancia de carbono 13 natural es adecuada para las tasas de recambio para períodos de años a siglos y el carbono 14 para períodos de siglos a milenios. Ambos pueden ser aplicados a muestras masivas de suelos o a fracciones aisladas de los mismos. El método de la abundancia de carbono 13 natural puede ser usado solamente si en ese sitio ha ocurrido un cambio de vegetación de un tipo fotosintético C3 a un tipo C4 o viceversa.

La gran ventaja de los métodos isotópicos radica en que la tasa de recambio de la materia orgánica puede ser medida de modo de deducir directamente el tiempo de residencia de los diferentes compartimentos. Cuando hay un cambio importante en la vegetación (bosques/cultivos/pasturas) es posible seguir la evolución de los distintos tipos de residuos de las plantas (Cerri *et al.*, 1985).

Los diferentes reservorios de carbono que existen en el suelo tienen distintos tiempos medios de residencia variando de uno a pocos años, dependiendo de la composición bioquímica -por ejemplo, la lignina es más estable que la celulosa-, a décadas o a más de 1 000 años (fracción estable). También hay alguna conexión con la composición, pero principalmente con el tipo de protección o el tipo de uniones químicas. Para la fracción del carbono estable se debe hacer una distinción entre la protección física o química o captura: *protección física* significa un encapsulado de los fragmentos de la materia orgánica por las partículas de arcilla o por los macro- o microagregados del suelo (Figura 3) (Puget *et al.*, 1995; Balesdent *et al.*, 2000);





protecci3n química se refiere a uniones especiales de la materia orgánica con otros constituyentes del suelo -coloides o arcillas-, pero más a menudo esto concierne compuestos orgánicos del suelo muy estables. Sin embargo, el término *captura de carbono* tal como se usa en el Protocolo de Kyoto no toma en consideraci3n esas distinciones y es equivalente al término *almacenamiento* de cualquier forma de carbono.

Los diferentes grupos de materia orgánica en los suelos son influenciados por distintos factores. Las partículas de materia orgánica libre y la biomasa microbiana de los suelos son controladas por el aporte de residuos -manejo de residuos de cultivos o cobertura del suelo- y el clima. La agregaci3n del suelo, la textura y la mineralogía controlan la materia orgánica en macroagregados y por lo tanto, la labranza tiene un gran efecto sobre el tamaño de esos reservorios. Los otros reservorios son menos afectados por los factores agron3micos pero lo son sobre todo por factores pedol3gicos (microagregaci3n, composici3n de la arcilla).

El papel fundamental de la materia orgánica en los suelos

La materia orgánica del suelo es un indicador clave de la calidad del suelo, tanto en sus funciones agrícolas (p. ej. producci3n y economía) como en sus funciones ambientales -entre ellas captura de carbono y calidad del aire. La materia orgánica del suelo es el principal determinante de su actividad biol3gica. La cantidad, la diversidad y la actividad de la fauna del suelo y de los microorganismos est n directamente relacionadas con la materia orgánica. La materia orgánica y la actividad biol3gica que esta genera tienen gran influencia sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos (Robert, 1996b). La agregaci3n y la estabilidad de la estructura del suelo aumentan con el contenido de materia orgánica. Estas a su vez, incrementan la tasa de infiltraci3n y la capacidad de agua disponible en el suelo así como la resistencia contra la erosi3n hídrica y e3lica. La materia orgánica del suelo también mejora la dinámica y la biodisponibilidad de los principales nutrientes de las plantas.

MANEJO DEL CARBONO EN TIERRAS ÁRIDAS Y EN ÁREAS TROPICALES

Este informe hace énfasis en las tierras áridas y en las tierras tropicales, que son las zonas de mayor interés para los países en desarrollo.

Las tierras áridas se definen por el índice de aridez que representa la relación de la precipitación con la evapotranspiración potencial (P/PET) 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 (Middleton y Thomas, 1997). Las tierras áridas representan cerca del 40 por ciento de las tierras del globo. 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.

Si bien el contenido de carbono y la capacidad de fijar CO₂ por unidad de superficie en las tierras áridas son bajos, pueden de cualquier manera hacer una contribución importante a la captura global de carbono y al mismo tiempo prevenir o disminuir la tasa de desertificación. Con esta amplia definición, una gran parte de las tierras áridas se incluye en el área tropical definida como la parte intertropical del mundo, la que representa el 37,2 por ciento de la superficie terrestre (4 900 millones de hectáreas).

Las tierras también pueden ser clasificadas de acuerdo a su tipo de ocupación. Las tierras cultivadas representan 750 millones de hectáreas en la zona templada y 650 millones de hectáreas en la zona tropical. La extensión total de tierras disponibles para los cultivos en zonas de secano es de alrededor de 2 600 millones de hectáreas, pero los bosques cubren una parte de las mismas -1 700 millones de hectáreas- y otra parte no puede ser efectivamente usada a causa de serias limitaciones (Alexandratos, 1995). Los tierras bajo riego -120 millones de hectáreas- están incluidas.

Los bosques tropicales cubren grandes áreas que representan más de 2 000 millones de hectáreas y son fundamentales para la salud del planeta. La mayor parte de estas áreas se encuentran en los países en desarrollo. La mejor solución sería protegerlas o por lo menos asegurar el mejor manejo posible, especialmente en la parte de los mismos que ya está degradada (13 por ciento en América del Sur, 19 por ciento en África y 27 por ciento en Asia); otras posibles soluciones serán discutidas más adelante.

Las pasturas permanentes o las tierras de pastoreo cubren más de 3 000 millones de hectáreas, la mayor parte de las cuales está en tierras áridas; el estado de degradación de estas tierras es estimado entre 14 y 31 por ciento.

De acuerdo a la *Evaluación Global de la Degradación del Suelo* (GLASOD, Oldeman *et al.*, 1991), las tierras degradadas representan una gran proporción de los distintos tipos de tierras, cualquiera sea su tipo de ocupación. El total llega a 1 965 millones de hectáreas en todo el mundo, la mayoría de las cuales se encuentra en áreas tropicales y en tierras áridas (Cuadro 1).

Las degradaciones física y química, que son los procesos principales, muy a menudo resultan en degradación biológica (Robert y Stengel, 1999). La erosión hídrica y eólica componen, cuantitativamente, los procesos de degradación más importantes. Las principales causas son la deforestación, el sobrepastoreo y el mal manejo de los suelos. La pérdida de materia orgánica no ha sido identificada como un proceso específico de degradación, pero cerca de la mitad de los suelos químicamente degradados están exhaustos.

CUADRO 1

Degradación mundial de suelos en relación a los cuatro procesos principales de degradación* (terreno moderada a extremadamente degradado, millones de ha) (de Oldeman *et al.*, 1991)

Área **	Erosión hídrica	Erosión eólica	Degradación química	Degradación física	Total (x 10 ⁶ ha)
África	170	98	36	17	321
Asia	315	90	41	6	452
América del Sur	77	16	44	1	138
América Central y del Norte	90	37	7	5	139
Europa	93	39	18	8	158
Australia	3	15	1	2	21
Total	748	295	147	39	1 229**

* Los tres factores causantes, de importancia similar, son deforestación, sobrepastoreo y mal manejo agrícola

** El total llega a 1 965 millones de hectáreas si se agregan los suelos ligeramente afectados

El contenido de materia orgánica del suelo es por lo general más bajo donde la degradación es más severa. La cantidad de carbono que puede ser capturada por medio de la rehabilitación de tierras degradadas será, por lo tanto, importante en áreas donde es técnica y socioeconómicamente una opción viable. En los suelos tropicales, la degradación de los suelos inducida por la hombre afecta del 45 al 65 por ciento de las tierras agrícolas, dependiendo del continente (GLASOD, Oldeman *et al.*, 1991). Esta situación hace que el margen de progreso para la captura de carbono en suelos tropicales degradados sea muy alto. Los beneficios adicionales relacionados incluirán el mejoramiento de las propiedades químicas, la biodisponibilidad de elementos -mayor fertilidad- y la resiliencia contra la degradación física, especialmente de la erosión. Por lo tanto, el secuestro de carbono contribuirá a restaurar la calidad de los suelos degradados.

Ecosistemas forestales: emisión de CO₂ y captura de carbono en los suelos

El almacenamiento de carbono y su liberación por los ecosistemas forestales -ya sea a causa de la forestación, la reforestación o la deforestación- están considerados en el Artículo 3.3 del Protocolo de Kyoto. Sin embargo, el Artículo 3.4 también se considera cuando se trata del manejo de bosques en zonas tropicales en razón de las importantes interacciones con la captura de carbono en los suelos.

Los bosques cubren el 29 por ciento de las tierras y contienen el 60 por ciento del carbono de la vegetación terrestre. El carbono almacenado en los suelos forestales representa el 36 por ciento del total del carbono del suelo a un metro de profundidad (1 500 Pg). Recientemente fue llevado a cabo un balance completo de los bosques de Francia por Dupouey *et al.*, 1999. Este estudio comprendió 540 parcelas de la red europea de supervisión forestal. La media total del carbono del ecosistema fue de 137 t C/ha; de este total, el suelo representa el 51 por ciento (71 t), los restos vegetales superficiales 6 por ciento y las raíces 6 por ciento. Estos datos son muy cercanos a los proporcionados en el último informe del IPCC (IPCC 2000) para los bosques en Tennessee (Estados Unidos de América). También se proporcionan datos para los bosques tropicales cerca de Manaus (Brasil). El total de carbono en el sistema es mayor (447 t/ha) y así como el depósito de suelo orgánico (162 t, 36 % del total) (Figura 4).

Los ecosistemas forestales contienen más carbono por unidad de superficie que cualquier otro tipo de uso de la tierra y sus suelos -que contienen cerca del 40 por ciento del total del carbono- son de importancia primaria cuando se considera el manejo de los bosques.

Por lo general, en los bosques naturales el carbono del suelo está en equilibrio, pero tan pronto como ocurre la deforestación -o la reforestación-, ese equilibrio es afectado. Actualmente, se estima que cada año son deforestadas entre 15 y 17 millones de hectáreas, sobre todo en los trópicos (FAO, 1993) y que muy a menudo parte del carbono orgánico se pierde dando lugar a una considerable emisión de CO₂. Por lo tanto, donde la deforestación no puede ser detenida, es necesario un manejo correcto para minimizar las pérdidas de carbono. La reforestación, sobre todo en los suelos degradados con bajo contenido de materia orgánica, será una forma importante de secuestro de carbono a largo plazo, tanto en la biomasa como en el suelo.

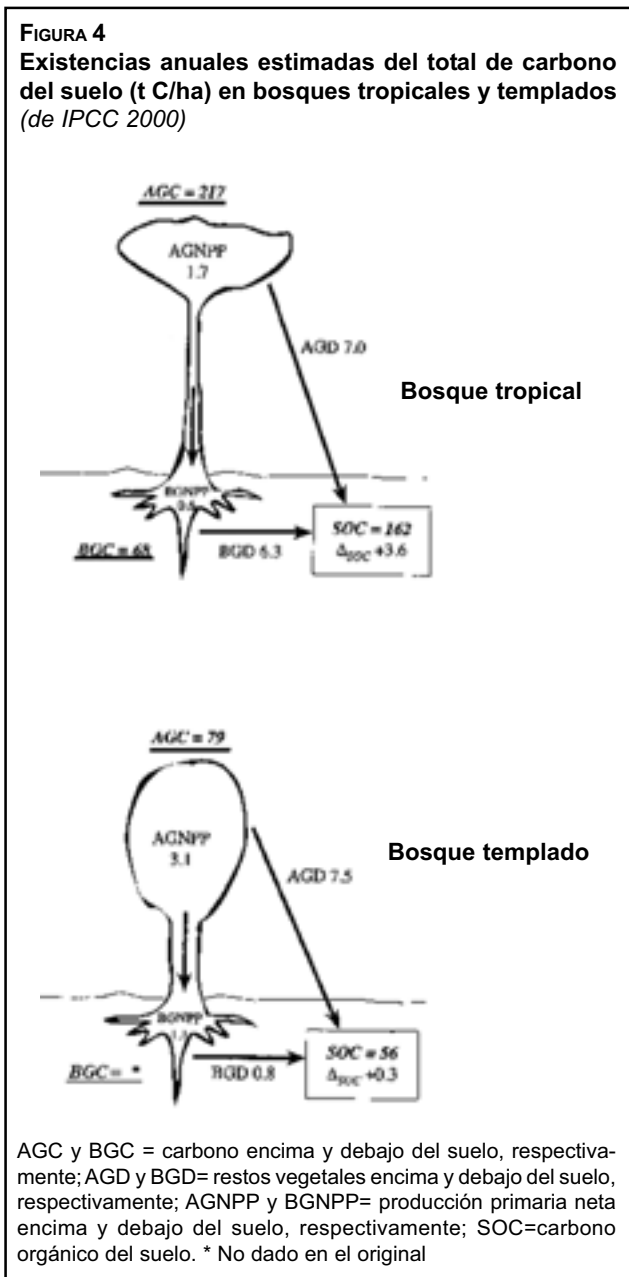
Tierras de pastoreo: un gran potencial como sumidero de carbono

Las tierras de pastoreo están incluidas en el Artículo 3.4 del protocolo de Kyoto y, como los bosques, juegan un papel importante en el secuestro de carbono. En primer lugar, las tierras de pastoreo, según la FAO, ocupan 3 200 millones de hectáreas y almacenan entre 200 y 420 Pg en el ecosistema total, una gran parte del mismo debajo de la superficie y, por lo tanto, en un estado relativamente estable. El carbono del suelo en las tierras de pastoreo es estimado en 70 t/ha, cifra similar a las cantidades almacenadas en los suelos forestales (Trumbmore *et al.*, 1995; Balesdent y Arrouays, 1999). Debido a la poca confiabilidad de los datos, las estadísticas de la FAO sobre uso de la tierra no proporcionan más el área de las tierras de pastoreo.

Muchas áreas de tierras de pastoreo en las zonas tropicales y áridas son mal manejadas y están degradadas; por lo tanto, ofrecen variadas posibilidades de secuestro de carbono.

Tierras cultivadas: el papel de las prácticas agronómicas

El desarrollo de la agricultura ha implicado una gran pérdida de materia orgánica del suelo. Hay varias formas de las diferentes prácticas de manejo de tierras que pueden ser usadas para



aumentar el contenido de la materia orgánica del suelo (Figura 9) tales como el incremento de la productividad y de la biomasa -variedades, fertilización e irrigación. El cambio climático global puede tener un efecto similar. Las fuentes de materia orgánica también incluyen residuos orgánicos, composte y cultivos de cobertura.

Las principales formas de obtener un incremento de la materia orgánica en el suelo están asociadas a la agricultura de conservación y comportan la labranza mínima o cero y el uso de una cobertura vegetal continua y protectora formada por materiales vegetales vivos o muertos sobre la superficie del suelo.

Capítulo 2

La evaluación del almacenamiento del carbono en el suelo y los principales cambios

En los próximos 25 años, para estimar el potencial de captura de carbono en suelos bajo distintos escenarios (Batjes, 1999) será necesario distinguir dos aspectos: cuál es la existencia original de carbono en el suelo y cuáles son los cambios en las existencias de carbono.

MEDIDA DE LAS EXISTENCIAS DE CARBONO EN EL SUELO

La materia orgánica que está sobre la superficie del suelo no es tomada en consideración en la evaluación de las existencias de carbono del suelo. En los suelos cultivados, esto significa que los residuos vegetales son considerados una fase transitoria; sin embargo, los residuos superficiales de los cultivos, los cultivos de cobertura o la cobertura en si misma son partes importantes del agrosistema. Del mismo modo, los residuos de los bosques pueden llegar a 8 o 9 kg/C/m² en los bosques de zona templada (Dupouey *et al.*, 1999) y a 5 o 6 kg/C/m² en un bosque tropical sobre un ferralsol (Andreux y Choné, 1993). Las raíces vivas son consideradas como biomasa de carbono y en las tierras de pastoreo, por ejemplo, pueden contribuir con la mayor parte del carbono del suelo.

El método más comúnmente aplicado es la determinación del carbono orgánico total a diferentes profundidades o globalmente para uno o más horizontes y transformar los datos tomando en consideración la densidad y la pedregosidad del suelo. Las estadísticas se calculan sobre diferentes muestras para determinar las existencias de carbono. Los resultados pueden ser expresados en kg/cm², t/ha o Gt (Pg) totales sobre áreas especificadas y a varios rangos de profundidad.

La escala puede ser el lugar o parcela, la cuenca, la región, un país específico o un continente o la zona agroecológica (FAO/IIASA, 1999). La extensión espacial es construida usando mapas digitales para las distintas unidades de suelos considerados. El número de análisis de perfiles de suelos usados es muy importante y hasta ahora, en general, ha habido una falta de buenos datos referenciados.

Con respecto a las existencias de carbono a escala mundial, hay tres referencias importantes. Sombroek *et al.*, (1993), usaron el *Mapa Mundial de Suelos FAO/UNESCO* (a escala 1:5 000 000) y cerca de 400 perfiles de suelos, agrupados por unidades de suelo de la FAO, con el rango y los valores medios para el contenido de carbono orgánico y la densidad para cada unidad de suelo. Fue posible estimar las existencias de carbono orgánico según los grupos de suelos de la FAO y las existencias de carbono total en el mundo.

Post *et al.*, (1982) y Eswaran *et al.*, (1993) usaron el *U.S. Soil Taxonomy* y más perfiles de análisis (cerca de 16 000), la mayoría de los cuales provenían de pedones en los Estados Unidos

CUADRO 2

Contenido medio de carbono orgánico para algunas unidades de suelos FAO-UNESCO y unidades de suelos WRB

Unidad del suelo		Contenido medio de carbono kg/m ²		
FAO-UNESCO	WRB	0 - 30 cm	0 - 100 cm	0 - 200 cm
Podzoles	Podzoles	13,6	24,2	59,1
Rendzinas	Leptosoles	13,3	-	-
Litosoles	Leptosoles	3,6	-	-
Chernozems	Chernozems	6,0	12,5	19,6
Nitsoles	Nitsoles	4,1	8,4	11,3
Xerosoles	Calcisoles/Cambisoles	2,0	4,8	8,7
Yermosoles	Calcisoles/Gypsisoles	1,3	3,0	6,6
Ferralsoles	Ferralsoles	5,7	10,7	16,9
Vertisoles	Vertisoles	4,5	11,1	19,1
Andosoles	Andosoles	11,4	25,4	31,0

(Nota: una correlación 1:1 con las unidades WRB parece ser "riesgosa" para algunas de estas unidades)

Fuente: FAO/UNESCO (1974) y unidades de suelos WRB (de Batjes, 1996)

de América (WSR-SCS). La estimación total de las existencias de carbono orgánico es de 1 550 Pg; se ofrecen más detalles relativos a las existencias de carbono para los diferentes órdenes o subórdenes de suelos o para las distintas profundidades de los perfiles. En conclusión, los autores remarcan en su estimación la importancia de tomar en consideración el uso de la tierra y los cambios en el manejo de la tierra.

Más recientemente, Batjes (1996) llevó a cabo una revisión de las estimaciones usando la base de datos *Wise* con 4 353 perfiles (19 222 análisis de carbono), con una representación geográfica más significativa. Este estudio confirmó un total de carbono del suelo de cerca de 1 500 Pg en los horizontes superiores (0-100 cm) pero a su vez reveló la presencia de existencias importantes y estables de carbono a profundidades entre 100 y 200 cm de profundidad, especialmente en suelos tropicales (Cuadro 2). El autor consideró que el sistema general de información de suelos (FAO/UNESCO, 1974) no estaba completamente adaptado como para permitir la estimación de cambios en las propiedades del suelo inducidas por los cambios en el uso de la tierra u otros factores, por ejemplo, el cambio climático.

Los datos presentados en la Cuadro 2 ilustran la gran variación del carbono orgánico en relación a los tipos de suelos. Los valores son de 2 kg/m² para xerosoles o arenosoles o más de 10 kg/m² para podzoles, andosoles o rendzinas. Las cantidades totales de carbono en los suelos de las zonas áridas (xerosoles, yermosoles) son bajos, cerca de 7 kg/m², comparados con los suelos en los trópicos de cerca de 15 a 30 kg/m², pero son distintos dependiendo de la textura y la mineralogía.

Los contenidos de carbono en el suelo dependen de los principales factores a largo plazo relacionados con la formación del suelo pero pueden ser fuertemente modificados -degradados o mejorados- por los cambios en el uso y el manejo de la tierra.

Muchos de los citados estudios estadísticos sobre las existencias de carbono del suelo y su distribución se basaron esencialmente en mapas de suelos. Recientemente, se han hecho evaluaciones similares en Francia (Arrouays *et al.*, 1999) las cuales toman en consideración los tipos de suelos y la cubierta vegetal. Los análisis de carbono del suelo disponibles fueron datos pedológicos georreferenciados que procedían de datos de la base nacional de datos y de una red sistemática de supervisión del suelo (16 x 16 km) disponible a escala europea pero

CUADRO 3

Total de existencias de carbono orgánico del suelo (COS) y contenido medio (kg C/m²) en las principales Zonas Agroecológicas (para los 0,3 y 1 m superiores) (de Batjes, 1999)

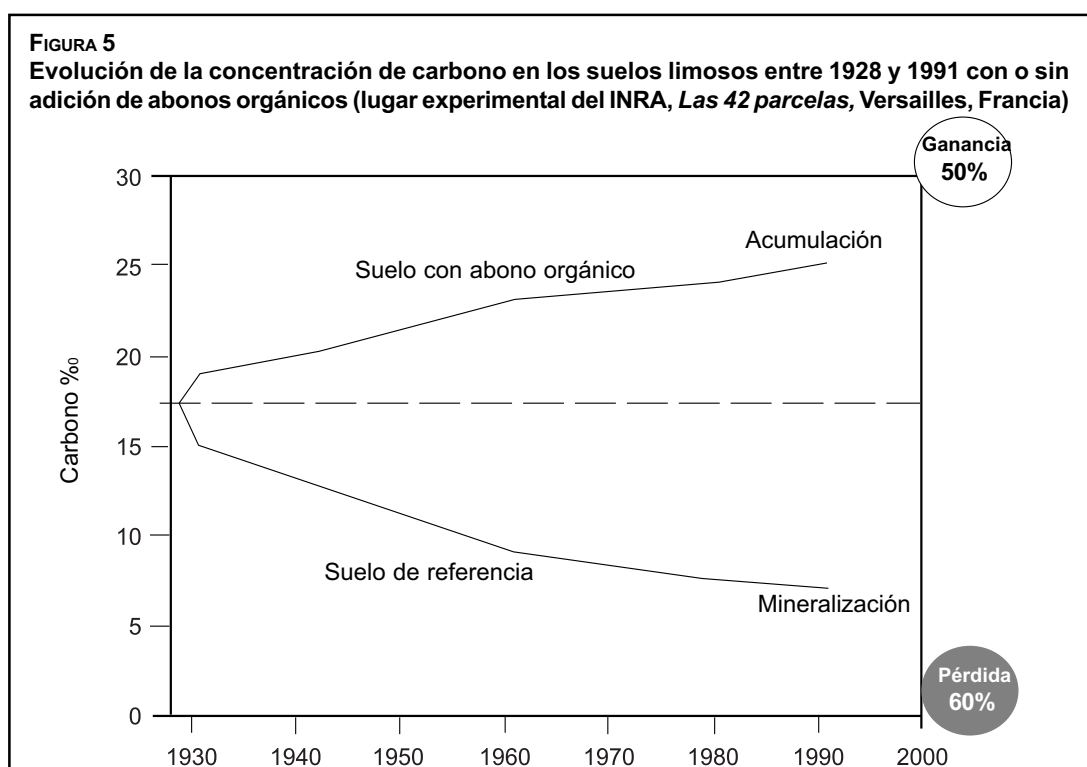
Zona Agroecológica	Reservorios de COS pesados espacialmente (Pg C)		Densidad media del COS (kg/m ²)	
	hasta 0,3 m profundidad	hasta 1 m profundidad	hasta 0,3 m profundidad	hasta 1 m profundidad
Trópico, cálido húmedo	92 - 95	176 - 182	5,2 - 5,4	10,0 - 10,4
Trópico, cálido, estacionalmente seco	63 - 67	122 - 128	3,6 - 3,8	7,0 - 7,3
Trópico, fresco	29 - 31	56 - 59	4,4 - 4,7	8,4 - 8,9
Árida	49 - 55	91 - 100	2,0 - 2,2	3,7 - 4,1
Subtrópicos con lluvias de verano	33 - 36	64 - 68	4,5 - 4,7	8,6 - 9,1
Subtrópicos con lluvias de invierno	18 - 20	37 - 41	3,6 - 3,9	7,2 - 8,0
Oceánico templado	20 - 22	40 - 44	5,8 - 6,4	11,7 - 12,9
Continental templado	21 - 126	1233 - 243	5,6 - 5,9	10,8 - 11,3
Boreal	203 - 210	478 - 435	9,8 - 10,2	23,1 - 24,0
Polar y alpino (excl. hielos terrestres)	57 - 63	167 - 188	7,0 - 7,8	20,6 - 23,8

limitada a suelos forestales. La información de un mapa de suelos y de un mapa de uso de la tierra fue usada para producir estadísticas simples sobre las existencias de carbono bajo diferentes tipos de uso de la tierra (con 13 tipos de uso, de acuerdo con las definiciones *Corine Land Cover*) y tipos de suelos (con 17 grupos de suelos definidos por la FAO). El número total de combinaciones fue de 138. El mapa de carbono del suelo resultante para Francia permitió hacer una estimación de las existencias de carbono (3,1 Pg a una profundidad de 30 cm) y también para identificar los principales factores que controlan la distribución del carbono: uso de la tierra, tipo de suelo u otras características (climáticas, pedológicas, etc.).

Otros trabajos han intentado combinaciones similares entre tipo de suelos y vegetación (Howard *et al.*, 1995 en Gran Bretaña; Moraes *et al.*, 1998 en Rondonia, Brasil; Van Noordwijk *et al.*, 1997 en las zonas forestales húmedas).

Los datos del suelo y los datos del uso de la tierra deberían ser usados para determinar las existencias de carbono en el suelo. Mientras que los factores del suelo y los factores climáticos son importantes para explicar el almacenamiento de carbono o los reservorios en largos períodos, los cambios de vegetación o uso de la tierra determinan los cambios en la captura de carbono en períodos más cortos. A menudo, sin embargo, en la mayor parte de los perfiles de suelos disponibles, la historia de uso de la tierra no ha sido documentada.

Batjes (1999) también discutió la distribución del total de las existencias de carbono del suelo según las principales zonas ecológicas. Tales zonas muestran grandes diferencias en el almacenamiento del carbono orgánico (Cuadro 3), sobre todo en relación a la temperatura y a la lluvia. Las existencias de carbono en el suelo hasta un metro de profundidad varían entre 4 kg/m² en las zonas áridas y 21-24 kg/m² en las regiones polares o boreales, con valores intermedios de 8 a 10 kg/m² en las zonas tropicales. La contribución de las regiones tropicales a las existencias globales de carbono en el suelo es de 384-403 Pg C a un metro de profundidad y 616-640 Pg C a dos metros de profundidad (Batjes, 1996), comparada con cerca de 1 500 Pg en todo el mundo (2 736-2 456 Pg a dos metros de profundidad). Las zonas áridas que cubren el 40 por ciento de la superficie global de tierras, almacenan sólo el cinco por ciento (100 Pg) del total. Estas zonas agroecológicas -desarrolladas por FAO- pueden constituir un marco de referencia para evaluar y supervisar el almacenamiento de carbono en los suelos.



EVALUACIÓN DEL CAMBIO EN EL ALMACENAMIENTO

Existen numerosos ejemplos históricos bien documentados de cambios en las existencias de carbono del suelo en las zonas templadas, muchos de ellos procedentes de experimentos agronómicos a largo plazo.

El experimento de Versailles (Francia) conocido como *Las 42 parcelas* fue establecido en 1929, sin ningún cultivo y quitando toda la vegetación natural y con o sin fertilización o enmiendas del suelo. El suelo es típicamente limoso con un contenido inicial de carbono de 1,7 por ciento. En 50 años el contenido de carbono orgánico en el suelo sin enmiendas disminuyó de un 60 por ciento a un 0,7 por ciento; en el suelo con fertilizantes orgánicos (100 t/ha/año) aumentó en 50 por ciento a 2,5 por ciento (Figura 5). En ambos casos, la tasa de cambio es decreciente y el nivel -nuevo estado de equilibrio- es cercano.

El experimento de Rothamsted -trigo Broadbalk- es el experimento agronómico a largo plazo más antiguo. Fue establecido en 1843 con cultivo continuo de trigo y con rotaciones y las parcelas han sido sometidas a diferentes tratamientos. La aplicación de estiércol ha llevado a la duplicación del contenido del carbono orgánico; con solo residuos de los cultivos, el contenido de carbono del suelo permaneció estable. En el mismo conjunto de experimentos (Rothamsted Highfield) la conversión de tierras de pastoreo a tierras arables resultó en una pérdida de 55 por ciento de carbono total en un plazo de 20 años, de 3,5 por ciento a 2 por ciento de carbono (Figura 6); pérdidas similares de carbono se encontraron donde las praderas naturales se convirtieron a tierras agrícolas, en Canadá o los Estados Unidos de América.

Otro experimento de larga duración (90 años) es el ensayo estático de fertilización de Bad Lauchstadt (Alemania) donde los resultados demuestran el efecto positivo de la fertilización -especialmente nitrógeno- sobre el contenido de carbono del suelo.

Estos experimentos a largo plazo ofrecen datos con los cuales es posible evaluar el efecto de los cambios en la cobertura y en el uso de la tierra pero también desarrollar o evaluar modelos. Están incluidos en *SOMNET*, una red de materia orgánica del suelo (Powlson *et al.*, 1998).

En todos estos experimentos, la labranza rutinaria de la tierra fue incluida como una práctica estándar. Sin embargo, un cierto número de experimentos a relativamente largo plazo (cerca de 20 años), en los Estados Unidos de América (Dick *et al.*, 1998), Alemania (Tebruegge y During, 1999) y Rusia (Kolchugina *et al.*, 1995) hicieron posible evaluar los efectos de distintos tipos de labranza y labranza cero sobre el almacenamiento de carbono; estas pueden disminuir el contenido de carbono orgánico entre 10 y 30 por ciento. En los Estados Unidos de América, ha sido establecida una red regional específica en los *Central Great Plains* sobre este tema (Lyon, 1998).

Experimentos similares también existen en bosques templados (Arrouays y Pellissier, 1994) y tropicales (Neill *et al.*, 1998) que permiten la evaluación de los efectos de la deforestación y de la reforestación en el almacenamiento de carbono en el suelo. La deforestación, por lo general, implica una pérdida casi total de la biomasa y de carbono debajo de la tierra entre 40 y 50 por ciento en el lapso de pocas décadas, la mitad de lo cual ocurre en menos de cinco años (Figura 7). El nuevo estado de equilibrio dependerá del nuevo uso de la tierra (Davidson y Ackerman, 1993; Sombroek *et al.*, 1993). En el caso de la deforestación seguida por pasturas (Neill *et al.*, 1998; Choné *et al.*, 1991), estudios sobre isótopos del carbono muestran el relativamente rápido reemplazo de las existencias del carbono original del suelo forestal por compuestos del carbono derivados de las pasturas. Con la reforestación, el carbono sobre y debajo de la superficie de la tierra se incrementará lentamente, dependiendo de la tasa de crecimiento de los árboles.

Otros experimentos a largo plazo sobre las emisiones y secuestro de carbono han sido llevados a cabo en zonas templadas. Un buen número de estudios comparativos a largo plazo muestra que los sistemas orgánicos y sostenibles mejoran los suelos por medio de la acumulación de materia orgánica y carbono en el suelo, con un incremento paralelo de la actividad microbiana: en Estados Unidos de América (Lockeretz *et al.*, 1989; Wander *et al.*, 1994, 1995; Petersen *et*

FIGURA 6
Evolución del carbono en el experimento de conversión de tierras de pastoreo a tierra arable en Rothamsted Highfields, Gran Bretaña (de Johnston, 1973)

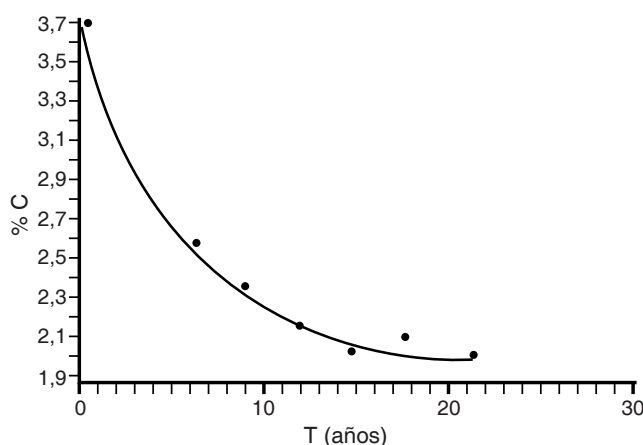
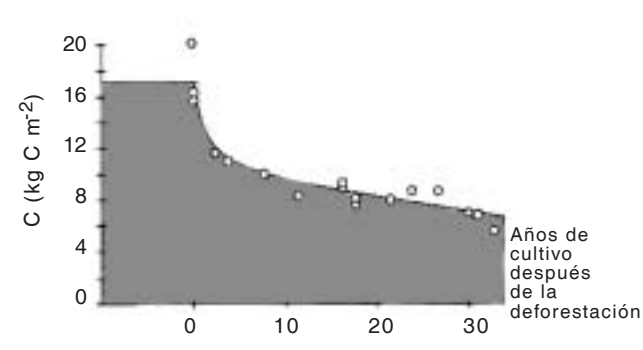
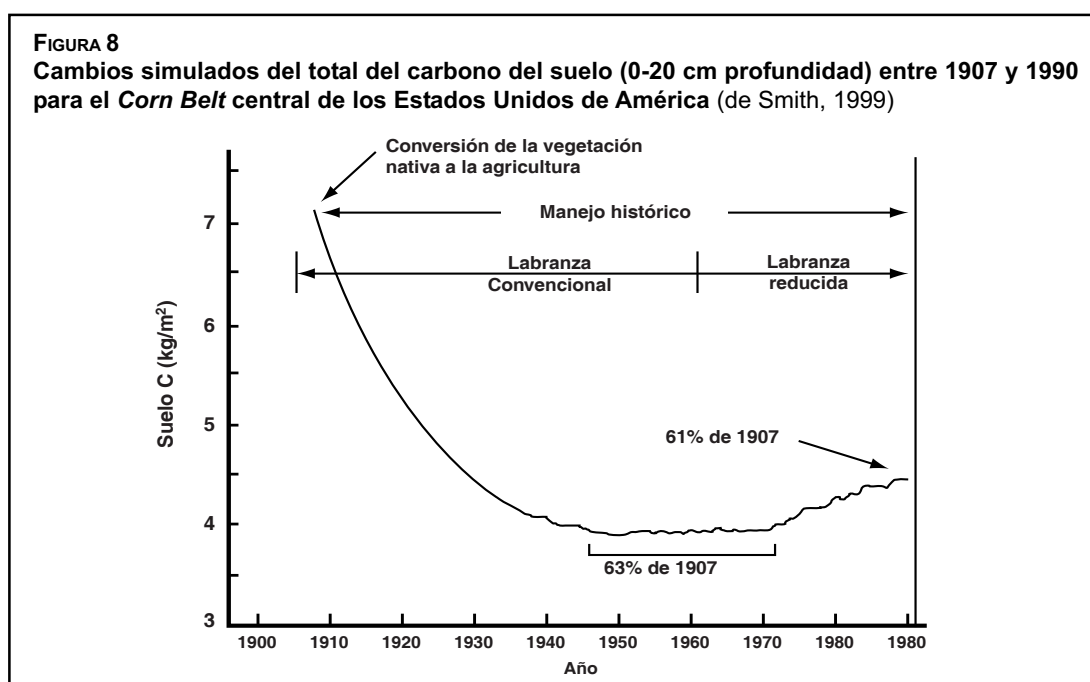


FIGURA 7
Disminución del carbono orgánico del suelo después de la deforestación y el cultivo de maíz (Arrouays y Pellissier, 1994)





al., 2000), Alemania (El Titi, 1999; Tebrügge, 2000), Reino Unido (Smith *et al.*, 1998; Tilman, 1998), países escandinavos (Katerer y Andrén, 1999), Suiza (FiBL, 2000) y Nueva Zelanda (Reganold *et al.*, 1987, 1993).

También existen experimentos a largo plazo en otras partes del mundo; una lista parcial anotada se encuentra en el sitio Web de la FAO¹. A menudo están en relación con centros internacionales de investigación agrícola (Greenland, 1994). Es necesario, sin embargo, establecer una base de datos sobre uso sostenible de la tierra (Swift *et al.*, 1994).

La reciente evaluación de las existencias de carbono en los Estados Unidos de América y especialmente las contribuciones de los cambios de uso de la tierra [Lal *et al.*, 1998a; Young, (FAO/IFAD, 1999); Houghton *et al.*, 1999] han dado lugar a polémicas sobre los sumideros no tan grandes de ese país (Field y Fung, 1999). En este caso, los Estados Unidos de América fueron divididos en siete regiones geográficas, cada una de ellas comprendiendo de dos a cinco ecosistemas naturales, sin incluir tierras de cultivo ni pasturas. En estas evaluaciones no fue tomado en consideración el tipo de suelo. El estudio estimó los cambios en las existencias de carbono del suelo en relación a cambios históricos del uso de la tierra desde 1700 a 1990. La cantidad total de carbono liberada por los suelos de los Estados Unidos de América hasta hoy es estimada por Lal entre 3 y 5 Pg.

Usando modelos se proyectó una acumulación de 2 Pg con labranza reducida. Los cambios simulados del carbono total del suelo a una profundidad de 0-20 cm se presentan en la Figura 8 (Smith, 1999). Dependiendo del grado de desarrollo de la práctica de la labranza reducida, la tasa de incremento del carbono en el suelo podía ser mayor. En los países del norte (Canadá, ex-Unión Soviética) se observan similares evoluciones y resulta el mismo tipo de simulación en el caso del uso de labranza cero (Gaston *et al.*, 1993).

¹ <http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/AGRICULT/AGL/agll/globdir/index.htm>

Estimaciones similares de los flujos anuales de almacenamiento de carbono en los suelos fueron hechas en Francia por Balesdent y Arrouays (1999). Los cálculos se basaron en registros históricos de áreas de uso de la tierra con atribuciones de las medias de reservorios de carbono en equilibrio para cada tipo de uso de suelo. Los valores para los diferentes reservorios de carbono total varían de 20 t/ha para tierras en descanso y viñedos a 50 t/ha para pasturas y 60 t/ha para bosques. Para evaluar el efecto del uso de la tierra sobre los distintos reservorios de carbono, se utilizó un modelo simple de dinámica del carbono en el suelo el que fue asociado con algunas constantes de tasas de descomposición de materia orgánica. Usando este método fue posible demostrar que los suelos de Francia habían acumulado más de 4 t/ha de carbono en el último siglo, con altas variaciones históricas. Un mapa reciente del carbono se presenta en el Anexo 1 (Arrouays *et al.*, 2000). Estos enfoques, basados en el uso de la tierra y sus flujos, son complementarios a aquellos basados en los reservorios de carbono.

Hay varios modelos de cambios de uso de la tierra y de dinámica del carbono que permiten una generalización espacial o simulación de la evolución del carbono del suelo en situaciones de cambios de uso de la tierra. En los Estados Unidos de América, se usan comúnmente dos modelos: *Century* y *DNDC*, que pueden reunir procesos de desnitrificación y descomposición. Normalmente están ligados a un *Sistema de Información Geográfica* (SIG). Ambos modelos requieren datos climáticos -temperatura y precipitación- de los lugares, los que están agrupados de acuerdo a amplias características del clima, características del suelo -sobre todo textura- y a información sobre manejo de la tierra -rotación de cultivos y rendimientos, labranza, riego, fertilización. En lo que se refiere a la materia orgánica del suelo en estos modelos, se distinguen dos formas de residuos: metabólicos y estructurales- y tres compartimientos: activo, lento, pasivo- con diferentes tiempos de residencia. Estos modelos se aplican solo a un tipo de suelo y bajo un único escenario de rotación de cultivos y labranza, dentro de un clima dado. Los productos de estos modelos son predicciones de almacenamiento de carbono en el suelo, rendimiento de los cultivos y emisiones de diferentes gases.

Arrouays y Pelissier, (1994) desarrollaron en Francia un modelo con el objetivo principal de predecir el efecto del uso de la tierra en la dinámica del carbono. Este modelo conocido como *Morgane*, toma en consideración diferentes compartimientos de la materia orgánica; será probado en varias regiones tropicales (Indias Occidentales o Brasil). Un número especial de *Geoderma* (1993, 81) fue dedicado a la comparación de nueve modelos diferentes de simulación usando datos de experimentos a largo plazo en regiones templadas, de los cuales Smith *et al.*, (1997) hicieron una aplicación para ecosistemas tropicales. Estos modelos también pueden ser usados para simular los efectos del cambio climático (Paustian *et al.*, 1998b).

El proyecto FAO-FIDA sobre captura de carbono aplica un modelo llamado *RothC-26-3* (Jenkinson y Rayner, 1977) diseñado durante los experimentos de Rothamsted para el recambio de la materia orgánica en regiones templadas, pero extendido ahora a las regiones tropicales (Ponce Hernández, 1999). El modelo *RothC*, ligado con un SIG, ha sido ya usado a nivel nacional en Hungría (Falloon *et al.*, 1998). También es considerado como uno de los modelos probables para evaluar el potencial de secuestro de carbono en el suelo en África occidental, usando un *Sistema de Información de Recursos del Suelo* (Batjes, 2001).

Capítulo 3

Manejo de las tierras forestales, de pastoreo y cultivadas para aumentar la captura de carbono en los suelos

BOSQUES

Si bien las tasas de captura de carbono pueden variar considerablemente, los bosques naturales pueden ser considerados en equilibrio dinámico en relación al carbono bajo ciertas condiciones climáticas y para ciertas concentraciones atmosféricas de CO₂. De acuerdo a Woerner *et al.* (1998), el bosque prístino, por ejemplo en la Amazonía, es el ecosistema que contiene la mayor cantidad de carbono (305 t/ha, de las cuales el 28 % en el suelo). Todos los cambios en el manejo de tales ecosistemas inducen cambios importantes en la dinámica del carbono, dando lugar a menores existencias de carbono que en el bosque original. Estas formas de manejo incluyen la agricultura de roza, tumba y quema, la deforestación, la forestación y la agrosilvicultura.

Los temas sobre deforestación están considerados en el Artículo 3.4 y sobre la forestación en el Artículo 3.3 del Protocolo de Kyoto. Los aspectos legales de definición de bosques no se discuten en este trabajo; solamente son considerados los aspectos relacionados con el cambio de uso de la tierra -principalmente el Artículo 3.4.

De acuerdo a la Evaluación Global de los Recursos Forestales de la FAO, la tasa global actual de deforestación es de cerca de 17 millones de hectáreas por año (FAO, 1993), alrededor de 0,45 por ciento de lo que resta del ecosistema forestal. La pérdida de carbono resultante, inmediata e importante, está parcialmente considerada en el 1,6 Gt de emisión del ciclo del carbono (Figura 1).

Aún si la parte superior de la biomasa fuera eliminada y quemada, entre 50 y 60 por ciento del carbono total del sistema está sobre la superficie del suelo o en el suelo -residuos, materia orgánica del suelo, raíces- y puede ser manejada adecuadamente.

Los experimentos *ECEREX* en la Guyana francesa (Sarrailh, 1990) mostraron que, dependiendo del tipo de deforestación y de la intensidad del disturbio físico -mecanizado o manual-, la tasa de erosión se puede incrementar entre 0 y 20 t/ha⁻¹/año⁻¹ y la escorrentía entre 0 y 250 mm/año. Medidas específicas de conservación (Chauvel *et al.*, 1991; Lal, 1990) pueden prevenir gran parte de esa degradación y de la pérdida de carbono resultante (Cuadro 4).

CUADRO 4
Efectos de la deforestación sobre la escorrentía y la erosión del suelo (Sarrailh, 1990 y Lal, 1990)

Método de deforestación	Escorrentía (mm/año)	Erosión del suelo t/ha/año
Bosque original	0	0
Tradicional	6,6	0,02
Manual	48	5
Tala total	104	4,80
Mecanizada	250	20

La **roza, tumba y quema** contribuye con cerca de 60 por ciento de la deforestación tropical. Este tipo de agricultura es llevada a cabo por 300 a 500 millones de pequeños agricultores en los trópicos para su subsistencia.

El bosque es eliminado por medio de la quema, lo que afecta principalmente la parte de biomasa que está sobre la tierra y una pequeña parte del carbono en el suelo hasta 3 cm de profundidad (Choné *et al.*, 1991). La quema y la mineralización de la materia orgánica resultante proporcionan nutrientes para el crecimiento de las plantas.

La magnitud de las pérdidas posteriores del carbono que queda en el suelo dependerán del tipo de uso del suelo que reemplace la cobertura forestal. Bajo las condiciones de la labranza convencional, la pérdida de carbono será considerable, como se mencionó anteriormente (40 a 50 por ciento en unas pocas docenas de años) con un alto nivel de liberación del mismo durante los primeros cinco años. Estas pérdidas son debidas sobre todo a la labranza.

En la agricultura de roza, tumba y quema, se incluye en el ciclo un período de descanso con arbustos, el que dependiendo de su duración puede restaurar parte del carbono del suelo y hacer que el sistema sea más o menos sostenible (Ponce Hernández, 1999). Si se establecen pasturas, las pérdidas son mucho menores y es probable que en pocos años haya una cierta recuperación de carbono gracias a la materia orgánica de los pastos (de Moraes *et al.*, 1996).

La **agrosilvicultura**, o sea la asociación de árboles con cultivos o pasturas puede representar una alternativa sostenible a la deforestación y a la agricultura de roza, tumba y quema (Winterbottom y Hazlwood, 1987; Sánchez *et al.*, 1999; Schroeder, 1994; Sánchez, 1995). Esta práctica tiene un gran potencial para la captura de carbono en tierras de cultivos (Sánchez *et al.*, 1999).

Schroeder (1994) llevó a cabo una evaluación del almacenamiento del carbono en diferentes ecorregiones. En las áreas tropicales, se puede obtener un almacenamiento de 21 a 50 t C/ha en zonas subhúmedas a húmedas, respectivamente, y con ciclos de corte de ocho o cinco años, mucho más cortos que en los bosques. En estos cálculos no se incluyó el carbono del suelo: sin embargo, las raíces por si solas podrían incrementar esos valores en 10 por ciento. En los principales sistemas agroforestales se podría mantener el carbono original presente en el ecosistema del bosque. Por ejemplo, en un período de 10 años, bajo cacao y bajo cacao/*Erythrina* sp. se obtuvieron aumentos de 10 y 22 t/ha, respectivamente (Fassbender *et al.*, 1991).

Schroeder (1994) también llevó a cabo una evaluación global de la tierra potencialmente disponible para su conversión a agrosilvicultura. Si bien este potencial está entre 600 y 1 000 millones de hectáreas, Schroeder estima que en los trópicos podrían haber 160 millones de hectáreas adecuadas para este sistema. El almacenamiento global de carbono estaría entre 1,5 y 8 Gt.

Otras estimaciones de la superficie de tierras con potencial para la agrosilvicultura son más altas: 400 millones de hectáreas en los próximos 25 años, incluyendo 100 millones de hectáreas de bosques a ser deforestados y 300 millones de hectáreas de tierras agrícolas degradadas (IPCC, 2000). Estimaciones complementarias indican 630 millones de hectáreas de tierras de cultivo y pastoreo en los trópicos.

Las estimaciones adicionales de las ganancias potenciales de carbono a partir de la agrosilvicultura se resumen en Young (1997).

IPCC (2000) hace dos tipos de evaluación para llegar a tasas válidas de conversión anual de la tierra. La primera concierne la transformación de los bosques después de la roza, tumba y

quema u otro tipo de deforestación. Esto es estimado por IPCC en 10,5 millones ha/año, correspondientes a 20 por ciento de los 15 millones de hectáreas que son actualmente deforestadas (3 millones de hectáreas) más 3 por ciento de los 250 millones de hectáreas de suelos degradados de bosques marginales (7,5 millones de hectáreas). Tomando el valor de la diferencia modal de 57 millones de hectáreas entre los usos de la tierra, la contribución global de la agrosilvicultura sería de alrededor de 0,3 Gt C/año.

En segundo lugar, los sistemas agroforestales pueden ser establecidos en tierras de cultivos improductivas con bajos niveles de materia orgánica y nutrientes. Tales áreas se encuentran sobre todo en zonas las subhúmedas de África tropical. En este caso, el principal problema es el carbono bajo tierra. La conversión a la agrosilvicultura podría triplicar las existencias de carbono, de 23 t a 70 t/ha en un período de 25 años. Solamente en África tropical subhúmeda, el beneficio sería de alrededor de 0,04 a 0,19 Gt C/año. En una primera etapa, se deberían sembrar cultivos de cobertura de leguminosas tales como *Sesbania sesban*, *Tephrosia vogelii*, *Gliricidia sepium*, *Crotalaria grahamiana*, *Cajanus cajan*, los cuales pueden proporcionar de 0,1 a 0,2 tN/ha/año. *Pueraria* sp. es una leguminosa bien conocida en Amazonía y en África que regenera la estructura del suelo gracias a su abundante desarrollo radicular.

En principio, la agrosilvicultura podría ser, por varias razones, una de las propuestas interesantes de cambios en el uso de la tierra relacionados con la captura de carbono. En primer lugar, porque la superficie involucrada es considerable y la tasa de ganancia de carbono es relativamente alta (0,2 a 3,1 t/ha/año -IPCC, 2000- o aún más, dependiendo del tiempo de residencia de los árboles). En segundo lugar, puede mitigar la importante emisión de CO₂ proveniente de la deforestación (Dixon, 1995). Finalmente, podría proporcionar un sistema sostenible desde el punto de vista técnico, ecológico y económico. Sin embargo, por razones sociales y culturales, tal tipo de manejo de la tierra es difícil de promover. Por lo tanto, la agrosilvicultura contribuirá, probablemente en menor grado a la captura de carbono.

Existen valores globales para estimar las tasas anuales de captura de carbono en la forestación de distintas zonas climáticas. La tasa total -por encima y debajo del suelo- en t C/ha/año aumenta desde las zonas boreales (0,4-1,2) y templadas (1,5-4,5) hacia las regiones tropicales (4-8) (Dixon, 1995). Los datos de IPCC (2000) sobre la distribución del carbono entre la biomasa aérea, las raíces, los residuos y en el suelo indican que el carbono del suelo por si solo representa más que el carbono de la biomasa forestal. Tales proporciones difieren dependiendo de la zona climática; con el máximo de carbono del suelo en las áreas frías -boreales y templadas- y mínimo en las áreas tropicales. Recientemente, Post y Kwon (2000), encontraron tasas de acumulación potencial de carbono más bajas en los suelos forestales (0,3 a 0,6 t/ha⁻¹/año⁻¹) que en los suelos de praderas.

Las enmiendas de suelos -con carbonato de calcio- o la fertilización incrementan la biomasa, tanto aérea como en el suelo, siempre que no haya otras condiciones limitantes. Como resultado, el carbono del suelo será por lo general incrementado; pero esto ocurre sobre todo en los países desarrollados. La fertilización con CO₂ en relación con el nivel de incremento atmosférico del CO₂ tendrá un efecto similar.

TIERRAS DE PASTOREO

Ya se han mencionado la gran extensión de las tierras de pastoreo y la importancia de las existencias de carbono. Mientras que el total del carbono presente en las praderas es menor que

en algunos ecosistemas forestales, la parte del carbono contenido en el suelo puede ser mayor. En general, el contenido de carbono de un suelo bajo pasturas es mayor que bajo cultivos.

Sin embargo, la gran mayoría -70 por ciento- de las tierras de pastoreo están degradadas. El sobrepastoreo es una de las principales causas de la degradación, especialmente en zonas subhúmedas, semiáridas o áridas donde predominan las pasturas (Pieri, 1989). El manejo con fuego es otro método utilizado para controlar las especies leñosas, lo que involucra alguna pérdida de carbono hacia la atmósfera si bien la transferencia principal es para el carbono vegetal, el cual puede llegar hasta un 30 por ciento del carbono total del suelo (Skjemstad *et al.*, 1996).

Una de las principales soluciones utilizadas en el manejo de las pasturas es el control del pastoreo -intensidad, frecuencia, estacionalidad- y también un mejor manejo del fuego para el control de las especies leñosas. Otras soluciones incluyen el mejoramiento del suelo y la calidad de los pastos.

En lo que se refiere al suelo, uno de los principales factores limitantes para el crecimiento de las plantas es la deficiencia de nutrientes. La fertilización en bajas dosis puede ser una solución (tal vez con P en lugar de N). Sin embargo, una mejor fertilización nitrogenada, más ecológica y más sostenible, se obtiene mediante la introducción de leguminosas fijadoras de nitrógeno. Otra solución puede ser la modificación de la calidad del pastoreo e introducir especies más productivas con sistemas radicales más profundos, más resistentes a la degradación de las pasturas. Todas estas soluciones incrementarán en buena medida la captura de carbono (Fisher *et al.*, 1994) ya que las pasturas pueden almacenar muy altas cantidades de carbono en forma estable. Paralelamente, el incremento de los rendimientos también puede ser importante, duplicando o triplicando la producción.

TIERRAS CULTIVADAS

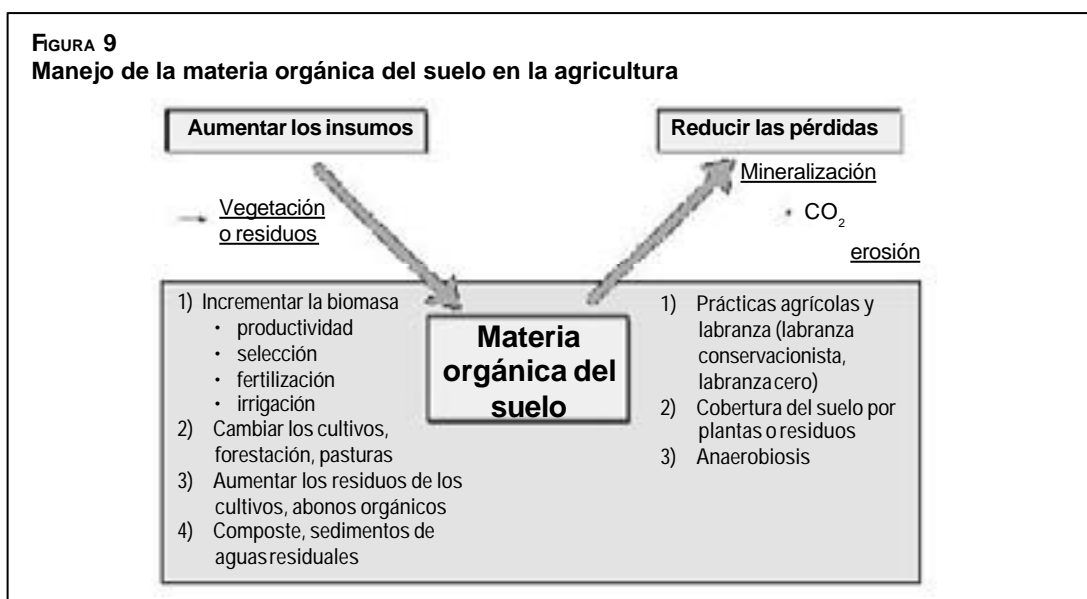
Como se indicó anteriormente, el manejo del suelo y de los cultivos puede mejorar en forma importante el tiempo de residencia y el almacenamiento del nuevo carbono en el suelo, lo cual es digno de consideración en el Protocolo de Kyoto (Buyanovski y Wagner, 1998) o en cualquier acuerdo post-Kyoto.

Los diferentes tipos de usos de la tierra y de prácticas agronómicas fueron evaluadas con respecto a su efecto sobre la captura y la liberación de carbono (Lal, 1999; Batjes, 1999). Se hace una distinción entre las prácticas que causan una disminución o pérdida de carbono, un incremento del ingreso de carbono en el suelo o una combinación de ambos (Figura 9).

Disminución de la pérdida de carbono

Aparte de los factores climáticos -principalmente la temperatura- los procesos más importantes que causan pérdidas de carbono del suelo son la erosión y la mineralización de la materia orgánica. La lixiviación del carbono orgánico e inorgánico es otro mecanismo importante de pérdida de carbono en el suelo.

La erosión del suelo, tanto hídrica como eólica, representan la forma más importante del proceso de degradación del suelo y afecta a más de 1 000 millones de hectáreas en todo el planeta. La pérdida de suelo varía, por lo general, entre 1 y 10 t/ha/año, llegando en algunos casos llega hasta 50 t.



Esto acarrea una pérdida importante de materia orgánica del suelo. La evaluación exacta de estas cantidades de carbono es difícil a causa de la heterogeneidad en el tiempo y en el espacio. La pérdida global por erosión podría estar entre 150 y 1 500 millones t/año, lo que es algo menor que lo que fue estimado a nivel continental (Lal, 1995; Gregorich *et al.*, 1998).

Con la excepción de algunos métodos específicos de control de erosión desarrollados en el pasado tales como las terrazas o las curvas de nivel, muchos de los métodos usados para prevenir la erosión del suelo están dirigidos a aumentar su estabilidad -de la cual la materia orgánica es uno de los principales factores- o a proteger la superficie del suelo con una cobertura vegetal, residuos de las plantas y otros. Tales métodos para prevenir la erosión del suelo son también apropiados para la captura del carbono, y viceversa. Por lo tanto, una disminución de la erosión podrá incrementar los efectos benéficos de los métodos de manejo y conservación de suelos (cobertura del suelo, labranza mínima, incremento de la materia orgánica). Por otro lado, el buen manejo del carbono del suelo ayudará a prevenir la erosión.

Los orígenes de las prácticas de labranza se remontan a miles de años atrás y han estado dirigidas a proporcionar aireación al suelo y controlar las malezas. El aumento de la aireación del suelo y los fuertes disturbios a que es sometido son los principales factores que estimulan la mineralización de la materia orgánica por los microorganismos del suelo. Los últimos trabajos (Balesdent *et al.*, 2000) demuestran que la labranza juega un papel importante en la *desprotección* de la materia orgánica presente en macroagregados -y en alguna medida en microagregados- (Figura 10). Las prácticas de labranza han sido la causa general de la disminución de la materia orgánica de suelos intensamente cultivados, especialmente en Europa, y las importantes emisiones de CO₂ ligadas a la agricultura del pasado.

Existe abundante literatura sobre los efectos de los distintos tipos de labranza (Monnier *et al.*, 1994; Paustian *et al.*, 1998a; Lal, 1997; Reicosky y Lindstrom, 1995). El Número Especial de *Soil and Tillage Research* 47 (1998) presenta principalmente una revisión en Canadá y Estados Unidos de América de los resultados obtenidos en 50 experimentos de campo a largo plazo en diferentes cultivos. Los incrementos del carbono en el suelo manejado con la labranza convencional comparados con la labranza cero varían entre 10 y 30 por ciento, respectivamente (Figura 11). Las diferencias de la captura de carbono entre la labranza convencional y la labranza

FIGURA 10

Protección física de la Materia Orgánica del Suelo (Chenu, sin publicar) y desprotección por la labranza (Balesdent *et al.*, 2000)

Materia orgánica del suelo físicamente protegida en agregados



Descomposición de los agregados =>
- mayor acceso para los organismos
- mayor disponibilidad de oxígeno

**Desprotección**

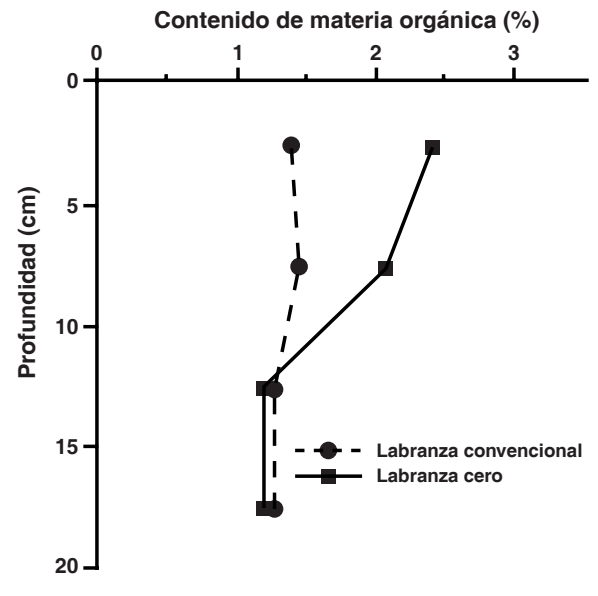
Labranza, descomposición de los agregados por la lluvia...

cero varían de acuerdo con las Zona Agroecológica y el tipo de suelo. Es necesario distinguir entre los diferentes tipos de labranza de conservación; cuando el contenido de carbono es muy similar bajo las dos condiciones, podría ser debido a las condiciones climáticas bastante frías de ambos experimentos.

La labranza de conservación y todos los tipos de labranza cero no tienen el mismo efecto sobre los sumideros de carbono en el suelo. Hay una clara evidencia empírica de que la agricultura de conservación, p. ej., mejor manejo de la tierra, mayor supervisión de la tierra en los países industrializados, (p. ej. Estados Unidos de América, Australia) no debería ser considerada de la misma manera que la labranza cero en América Latina. La agricultura de conservación con rotaciones intensivas de monocultura no conduce a una acumulación importante de carbono. Gran parte de la agricultura de conservación en los Estados Unidos de América, por ejemplo, tiende a ser un sistema agrícola moderno simplificado - evitando, por lo tanto, la erosión- pero con poca aplicación de principios agroecológicos para el buen manejo de los nutrientes, las malezas y las plagas (Pretty y Ball, 2001).

En la agricultura de conservación los residuos de los cultivos deberían cubrir más del 30 por ciento de la superficie del suelo (Lal, 1997). En este sistema, pueden ser capturadas en condiciones templado-húmedas 0,5 a 1,0 t C/año, 0,2 a 0,5 en los trópicos húmedos y 0,1 a 0,2 en las zonas semiáridas (Lal, 1999). Estas prácticas de labranza cero con cultivos de cobertura y/o abonos verdes en complejos sistemas de rotaciones llevan a una gran captura de carbono y cubren ahora más de 50 millones de hectáreas, la mayor parte de ellas en América del Norte

FIGURA 11

Efectos de la labranza convencional y de la labranza cero sobre el contenido de la materia orgánica en el perfil del suelo

(19 millones de hectáreas en Estados Unidos de América y 4 en Canadá), América Latina (Brasil 13 millones, Argentina 9, Paraguay + México + Bolivia 1,7) y Australia (8 millones). Los datos cambian rápidamente -algunos autores indican 60 millones de ha- porque hay una alta tasa de desarrollo de estas prácticas, sobre todo en Brasil y Argentina. La amplia difusión de la labranza de conservación en los Estados Unidos de América es responsable de que la agricultura esté ahora capturando carbono en los suelos. El Cuadro 5 ilustra una limitada difusión en Europa. Esta práctica se podría expandir por medio de políticas favorables a través de fondos agro-ambientales.

En algunos casos, la labranza cero puede tener un efecto desfavorable debido a un incremento en el contenido de agua y la hidromorfia con la consecuente emisión de gases de invernadero (Dao, 1998). Los diferentes efectos en relación a las características del suelo no han sido aún completamente esclarecidos (Tavarez Filho y Tessier, 1998).

La labranza convencional tenía también el propósito de controlar las malezas; en el período de transición a la agricultura de conservación, se realiza con otras prácticas, generalmente con herbicidas, por lo que es necesaria una evaluación desde el punto de vista ecológico (Monnier *et al.*, 1994; García Torres y Fernández, 1997).

Tales sistemas también tienen un efecto importante en la protección del suelo contra la erosión; dicho control fue la principal razón para su uso en los *Great Plains* de los Estados Unidos de América (*Conservation Reserve Program*) en los años 1930-1940.

La adopción de métodos que requieren un uso menos intensivo de la energía tales como la labranza cero puede reducir el total de las emisiones de carbono. La producción de arroz con bajos insumos o arroz orgánico en Bangladesh, China y América Latina es entre 15 a 25 veces más eficiente en el uso de la energía que el arroz bajo riego cultivado en los Estados Unidos de América. Por cada tonelada de cereales u hortalizas producidas en los sistemas industrializados con un alto nivel de insumos, se consumen de 3 000 a 10 000 MJ de energía, mientras que por cada tonelada de cereales u hortalizas obtenidas en un sistema agrícola sostenible se consumen solamente de 500 a 1 000 MJ (Pretty y Ball, 2001).

Los sistemas de labranza cero también presentan el beneficio adicional de requerir menos combustibles fósiles para la operación de la maquinaria. El uso de combustible en los sistemas convencionales (Tebruegge, 2000; Smith *et al.*, 1998) en el Reino Unido y en Alemania varía entre 0,046 y 0,053 t/C/ha/año, mientras que para los sistemas de labranza cero está comprendido solamente entre 0,007 y 0,029 t/C/ha/año (0,007 es para el uso directo de energía solamente y 0,029 incluye la energía contenida en los herbicidas). Comparado con los ahorros que significan la reducción de las pérdidas reducidas de carbono y el aumento de captura de carbono en los suelos, estos representan solamente una pequeña parte de los ahorros totales (aproximadamente siete por ciento).

La agricultura de conservación -concepto FAO- o la agricultura agrobiológica -concepto CIRAD- también favorecen el funcionamiento biológico del suelo siendo el cambio más evidente

CUADRO 5
Área mundial de los suelos cultivados bajo labranza cero

País	Superficie (millones ha)
Estados Unidos de América ¹	19,0
Brasil ²	13,0
Argentina ³	9,0
Australia ⁴	8,0
Canadá ⁵	4,0
Paraguay ⁶	0,8
México ⁷	0,7
Bolivia ⁸	0,2
Chile ⁹	0,1
Colombia ¹⁰	0,07
Uruguay ¹¹	0,05
Venezuela ¹²	0,05
Europa ¹²	0,5 a 1

Fuentes: (1) No-till Farmer, marzo 1999; (2) FEBRAPDP, 2000; (3) AAPRESID, 2000; (4) Bill Crabtree, WANTFA; (5) Hebblethwaite, CTIC, 1997; (6) MAG-GTZ, Soil conservation Project, 1999; (7) Ramón Claverán, CENAPROS, 1999; (8) Patrick Wall, CIMMYT, 1999; (9) Carlos Crovetto, 1999; (10) Roberto Tisnes, Colombia, 1999; (11) AUSID, 1999; (12) estimaciones.

el aumento de la microflora y de la fauna. La función de los sistemas de la agricultura de conservación y de la labranza cero es proteger físicamente el suelo de la acción del sol, la lluvia y el viento y alimentar la biota del suelo. El resultado es una menor erosión del suelo y mejor contenido de materia orgánica y de carbono.

Otro aspecto importante de la labranza cero se relaciona con los herbicidas. Algunos de los trabajos más importantes hechos en Brasil se refieren a los sistemas de labranza cero libres de herbicidas -con cultivos de cobertura y abonos verdes usados en lugar de los mismos (ver Petersen *et al.*, 2000).

Incremento del ingreso de materia orgánica al suelo

El incremento de la biomasa de los cultivos puede aumentar el ingreso de materia orgánica en el suelo el que puede ocurrir, por ejemplo, por medio de la introducción de nuevas variedades o del manejo agronómico, como en el caso de los nutrientes -especialmente nitrógeno- y de la rotación de cultivos. Son necesarios cerca de 70-100 kg de nitrógeno para capturar una tonelada de carbono (Swift, sin publicar). El aumento del contenido de CO₂ en la atmósfera debido al cambio climático puede tener una influencia positiva similar, conocido como efecto de fertilización con CO₂ (Bazzaz y Sombroek, 1996). Todos estos factores combinados explican porque en ciertos países europeos -por ejemplo en Bélgica-, sin el suministro de abonos orgánicos y con prácticas de labranza convencional, en los últimos tiempos se ha incrementado el contenido de materia orgánica de los suelos cultivados. El manejo del agua -riego- asociada a un aumento de la productividad puede producir efectos similares, sobre todo en las regiones semiáridas. Sin embargo, el desarrollo del riego está limitado generalmente por otros factores tales como la disponibilidad de recursos hídricos y el riesgo de salinización. En algunos países, además de los cultivos de cobertura, los cultivos asociados representan una ayuda importante para incrementar la biomasa.

El incremento de la biomasa considera tanto la biomasa aérea como las raíces. Se podrían hacer considerables progresos sobre todo en lo que se refiere a las tierras de pastoreo seleccionando especies y variedades con raíces profundas.

El manejo de los residuos de los cultivos es otro método importante para capturar carbono en el suelo y aumentar su contenido de materia orgánica. La quema de los residuos tiene consecuencias negativas si bien algunas veces estas son mitigadas por la gran estabilidad del carbono mineral que se forma.

Los efectos positivos del uso de los residuos de los cultivos para inducir la captura de carbono fueron estimados por Lal (1997) en 0,2 Pg C/año con una transformación de 15 por ciento del total del carbono (globalmente, 1,5 Pg C). Por lo general, hay una relación lineal entre la materia orgánica en los primeros 15 cm de suelo y la cantidad de residuos de cultivos aplicados.

Los residuos de cultivos aplicados en la superficie se descomponen más lentamente que aquellos incorporados por la labranza ya que tienen menor contacto con los microorganismos y el agua del suelo. Angers *et al.*, (1995) informaron que la conversión del carbono de los residuos de maíz en materia orgánica del suelo en la primera capa de 0-24 cm fue de cerca de 30 por ciento del total del ingreso de carbono; este valor es mayor que la estimación de Lal. Evidentemente, hay diferencias cualitativas entre los residuos: el contenido de lignina del residuo tiene un efecto altamente positivo en su acumulación. En particular, las raíces son fácilmente transformadas en materia orgánica estable.

La agricultura con cobertura viva o muerta es una práctica concreta del manejo del suelo que permite al mismo tiempo su cobertura con plantas que dan protección contra la erosión y que proveen además residuos de biomasa para aumentar la materia orgánica del suelo. Para ser completamente efectiva, tanto la cobertura viva como la muerta deben ser efectuadas en el lugar y en combinación con la labranza de conservación (manejo agrobiológico). La cantidad de cobertura, dependiendo de la zona climática, debería ser de varias docenas de t/ha/año, para proporcionar una fuente importante de carbono al suelo de 0,1 t/ha/año, dependiendo de la zona climática (Lal, 1997). Existen una gran variedad de plantas que pueden ser usadas como cobertura del suelo y la calidad de los residuos de las plantas también es un factor importante (Heal *et al.*, 1997; Drinkwater *et al.*, 1998).

El suelo debe ser protegido durante el período inicial del crecimiento del cultivo; en este aspecto, los abonos verdes cumplen una importante función. Los abonos verdes han sido usados durante milenios, sobre todo para incrementar la fertilidad después de su incorporación al suelo. Hoy día son considerados como un cultivo dentro de la rotación que tiene un efecto directo en la protección del suelo durante el período de crecimiento y un efecto indirecto a través de sus residuos. Los abonos verdes pueden ser sembrados en el período que queda entre los cultivos principales o mezclados en asociación con otros cultivos o en forma perenne en las áreas en descanso. Algunos ejemplos comunes de cultivos para abono verde se presentan en el Cuadro 6, la que presenta una prevalencia de leguminosas. Anteriormente, los abonos verdes eran incorporados en el suelo por medio del arado, pero hoy día, las técnicas conservacionistas requieren labranza mínima o labranza cero y la siembra directa a través de la cobertura vegetal.

Varios estudios han demostrado que el control de malezas es más eficiente en los sistemas de producción con cobertura muerta superficial debido a la existencia de efectos alelopáticos. En estos casos, la necesidad de herbicidas se reduce o se elimina.

Existe abundante evidencia que demuestra la efectividad de la cobertura del suelo por plantas vivas o por residuos de plantas para prevenir la erosión hídrica o eólica. Se previene el impacto directo de las gotas de lluvia con la superficie del suelo, con la consecuente protección de la estructura y la porosidad del mismo.

La cobertura del suelo que proporcionan las plantas durante su ciclo de crecimiento no siempre es suficiente para prevenir la erosión. En Paraná, Brasil, se estableció el siguiente orden de intensidad de erosión de los suelos bajo diferentes cultivos:

$$\text{café} < \text{maíz} < \text{trigo} < \text{soja} < \text{algodón} < \text{suelo desnudo}$$

CUADRO 6
Diferentes sistemas basados en los cultivos usados para incrementar la captura de carbono (de CIRAD, 1998)

Cobertura	Cultivo asociado	Abono verde o cultivo de cobertura
Maíz	Maíz/Mucuna	Avena
Sorgo	Frijol Tapado ¹	<i>Crotalaria</i>
Algodón	Maíz y cobertura	<i>Lathyrus</i>
Soya	Arroz y leguminosas (<i>Sesbania</i> , <i>Crotalaria</i> , <i>Pueraria phaseoloides</i>)	<i>Lolium</i> , <i>Lupinus angustifolius</i> , <i>L. luteus</i>
Banana		<i>Melilotus</i>
Remolacha azucarera		<i>Sesbania cannabina</i> , <i>S. speciosa</i> , <i>Mucuna aterrima</i> , <i>M. pruriens</i> , <i>Trifolium</i> , <i>Vicia bengalensis</i> , <i>V. articulata</i> , <i>V. ervilia</i> , <i>V. faba</i> , <i>V. hirsuta</i> , <i>V. sativa</i> , <i>V. villosa</i> , <i>V. sinensis</i>

(1) Frijol tapado: *Phaseolus vulgaris* cultivado bajo el sistema de roza, tumba y quema de barbechos cortos, sin quema.

Por lo general, los residuos de cultivos en contacto directo con el suelo son más efectivos para prevenir la erosión que los cultivos mismos, y cinco a diez toneladas por hectárea, pueden reducir la pérdida de suelo y la escorrentía.

La cobertura del suelo aumenta la tasa de infiltración del agua en un porcentaje de varias centenas y previene la evaporación del agua, por lo que consecuentemente, hay un incremento de la humedad del suelo. Especialmente en las zonas áridas, la cobertura del suelo tiene una función muy importante en la economía del agua. También disminuye la temperatura, reduciendo la tasa de mineralización de la materia orgánica.

Los abonos verdes y los cultivos de cobertura pueden proporcionar una importante contribución al carbono del suelo como demuestran las experiencias en América Latina. En América Central hay cerca de 45 000 agricultores que han adoptado sistemas basados en la mucuna por medio de los cuales se pueden fijar cerca de 150 kg/ha/N/año y pueden ser añadidas al suelo 35-50 t/ha/año de biomasa. Esto representa una gran captura de carbono.

El composte y los abonos orgánicos son tradicionalmente usados en la agricultura con efectos benéficos comprobados sobre el suelo. En muchos países, existe el problema de la decreciente disponibilidad de tales materiales, los cuales están ligados al manejo de los animales. Hay competencia por los residuos de las plantas o por la cobertura para las plantas para ser usadas como alimento animal o para ser devueltos al suelo. Un manejo cuidadoso, asociando los cultivos con la producción animal, puede permitir la reintroducción de nuevas fuentes de abono orgánico o de composte.

El uso de barros cloacales y otros residuos urbanos es menos efectivo en razón de su baja tasa de transformación, excepto cuando son transformados en composte desde el inicio. Esta práctica tiene la ventaja de reciclar los residuos pero presenta el riesgo ambiental de la contaminación del suelo y es necesario tomar precauciones especiales.

Capítulo 4

Los diferentes escenarios de la captura de carbono

Este capítulo hace énfasis en las tierras áridas y en las zonas tropicales de interés para los países en desarrollo. Como se mencionó anteriormente, las estimaciones deben tomar en consideración el tipo de suelo y la región agroecológica, pero los principales factores son el tipo de uso de la tierra y el manejo específico del suelo y del cultivo. También es importante tomar en consideración los criterios de tierras degradadas según Oldeman *et al.*, (1991) si bien no pueden ser relacionados a contenidos específicos de materia orgánica del suelo.

OPCIONES DE MANEJO DE LA TIERRA PARA LA CAPTURA DE CARBONO

Se presenta una comparación entre la última evaluación de Lal (1999) para el proyecto FAO-FIDA (Cuadro 7) y los últimos datos de IPCC (2000), haciendo énfasis en las prácticas más provechosas para establecer prioridades. Todas las estimaciones se hacen en t/ha/año. Para este propósito, se asume que las actividades o las prácticas de manejo tienen una duración finita de 20 a 50 años, correspondientes a la capacidad limitada de los suelos de almacenar carbono (según el tipo de suelo). Este es un rango importante y será fundamental utilizarlo debidamente si es que se desea tener sistemas de intercambio de carbono eficientes.

Tierras cultivadas

En las tierras cultivadas, la labranza es la práctica más importante que puede tener un efecto considerable sobre las existencias de carbono, ya sea negativo cuando se usan los métodos

CUADRO 7

Principales efectos de las prácticas de manejo o de uso de suelos sobre la captura de carbono (t C/ha/año). Zonas áridas y tropicales (de Lal, 1999)

	ZONAS ÁRIDAS (3 000 millones ha)	ZONAS TROPICALES (húmedas y subhúmedas) (2 000 millones ha)	
TIERRAS DE CULTIVO			700 millones ha
Labranza de conservación	0,1-0,2	0,2-0,5	
Cultivos con cobertura viva o muerta	0,05-0,1	0,1-0,3	
Agricultura de conservación	0,15-0,3	0,3-0,8	
Con composte	0,1-0,3	0,2-0,5	
Manejo de nutrientes	0,1-0,3	0,2-0,5	
Manejo del agua	0,05-0,1		
TIERRAS DE PASTOREO	0,05-0,10	0,1-0,2	3 000 millones ha
REFORESTACIÓN		4 - 8	
AGROSILVICULTURA		0,2-3,1	1 000 millones ha

convencionales o positivo cuando se aplica la labranza de conservación. En el caso de la labranza de conservación, el Cuadro 7 muestra un rango de variación de la captura de carbono de 0,1-0,2 t/ha en las regiones semiáridas a 0,2-0,5 t/ha en las regiones tropicales húmedas. Los efectos favorables de la labranza de conservación son muy altos durante los primeros años, hasta que alcanzan un cierto plafón; esta tendencia puede ser rápidamente revertida si se reintroduce la labranza convencional. Muy a menudo, en los Estados Unidos de América, la labranza de conservación no es una verdadera práctica de no labranza como ocurre generalmente en Brasil y Argentina. La no labranza o labranza de conservación incluye el manejo de los residuos de los cultivos en el lugar lo cual asegura el ingreso de materia orgánica y la siembra directa a través de la cobertura de residuos. La labranza de conservación requiere un mínimo de 30 por ciento de residuos de cultivos, que a menudo no son suficientes para cubrir totalmente el suelo y prevenir la erosión. En las pendientes podría ser necesaria una cobertura de 70 por ciento (Benites, com. pers.). La competencia por los residuos es provocada por la necesidad de alimentar animales, por lo que es necesario encontrar un punto de equilibrio.

La segunda práctica importante -que debe ser combinada con la no labranza para ser efectiva- es el cultivo con cobertura viva o muerta. La l presenta valores de 0,1-0,3 t C/ha/año. El valor depende de la cantidad de cobertura (1 a 6 t/ha) y del tipo de la misma. Los cultivos de cobertura tienen un efecto similar o son aún más efectivos que la cobertura muerta que ofrecen los residuos sobre el suelo. En este caso, hay materia orgánica tanto por encima como por debajo del suelo, ya que además se agrega la proporcionada por las raíces. La producción de biomasa para cobertura requiere agua, por lo que esta práctica depende de la lluvia. Si la biomasa es producida en la rotación después de la cosecha, puede ser agregada al total de la captura de carbono que puede alcanzar a 1 t C/ha/año. Utilizando ciertas especies es posible influir en la distribución del carbono en el suelo o encima del mismo y en la profundidad de incorporación del carbono (profundidad de enraizamiento). Una lista de las especies utilizadas como cultivos de cobertura en diferentes condiciones climáticas presentada por CIRAD se encuentra en el Cuadro 6, si bien no hay datos sobre su efecto específico sobre la captura de carbono. Los residuos orgánicos tales como los barros cloacales tienen un bajo rendimiento de carbono estable en el suelo y además pueden contener cantidades importantes de contaminantes. Siempre que sea posible, ese tipo de materia orgánica debería ser madurado haciendo composte. Este es un enfoque valioso y la captura de carbono puede ser relativamente alta (0,2-0,5 t C cada 20 t/composte/ha). Sin embargo, es difícil encontrar buenas fuentes de composte.

En las zonas áridas o semiáridas, el uso de plantas de cobertura o de residuos es importante para suprimir el barbecho desnudo o para mejorar el barbecho. En estas áreas el uso de estiércol o composte también puede ser de importancia fundamental para iniciar la retención del agua y la producción de cultivos en zonas desertificadas. Uno de los mejores ejemplos para iniciar el desarrollo de la vegetación es el desarrollo de *tassa* -pequeños pozos para la siembra- usados en Níger para iniciar el desarrollo de la población vegetal.

La fertilización, al incrementar la biomasa obtenida, aumentará el carbono disponible para ser capturado en el suelo. Pero, para ser efectivo, esta captura implica el uso de las prácticas descritas anteriormente, incluyendo la no labranza. La llamada *intensificación agrícola* o el uso del riego -combinado con un buen drenaje- permiten un incremento de la producción de biomasa, pero las condiciones no son necesariamente compatibles con las requeridas para el almacenamiento de carbono.

Todas las prácticas dirigidas a la acumulación de carbono en las tierras cultivadas también restauran los suelos degradados o previenen la erosión: cualquier opción es igualmente favorable.

La pérdida de materia orgánica por erosión es así eliminada y la acumulación de materia orgánica aumentará.

Bosques

Además de la reforestación -la cual depende en buena parte de decisiones políticas- la agrosilvicultura representa una buena técnica y una buena opción ecológica de manejo de la tierra. Sin embargo, se debe tener presente que la agrosilvicultura es un sistema complejo que comprende al menos 18 prácticas distintas y un número virtualmente infinito de variaciones (Cairns y Meganck, 1994). Los árboles están asociados con los cultivos, con el ganado o con ambos. Todas las prácticas involucran la captura de carbono por lo que los cultivos deben ser plantados según las prácticas mencionadas anteriormente -labranza cero, cobertura con residuos, cobertura con cultivos. La tasa de absorción de carbono puede ser muy alta ya que la captura de carbono se efectúa tanto por los árboles como por los cultivos: de 2 a 9 t C/año, dependiendo de la duración (15 a 40 años). La agrosilvicultura puede ofrecer muchas ventajas, especialmente para los pequeños agricultores tanto en África como en América del Sur (Sánchez *et al.*, 1999). Sin embargo, necesita un manejo colectivo del espacio, por ejemplo de una cuenca. Las estadísticas disponibles indican que cerca de 185 millones de agricultores usan productos de la agrosilvicultura, con potencial para un mayor desarrollo. La aplicación del protocolo de Kyoto o de un acuerdo post-Kyoto podría ser una buena oportunidad para promover ese tipo de iniciativas, incluyendo la plantación de árboles y asumiendo que se puedan proporcionar incentivos socio-económicos adecuados bajo el CDM.

Pasturas y tierras de pastoreo

En todas las zonas agroecológicas, el sobrepastoreo es la principal causa de degradación pero los mecanismos que la causan son muy variables. En las áreas tropicales el sobrepastoreo favorece la compactación del suelo y las inundaciones; en las zonas áridas provoca principalmente una disminución en la cobertura del suelo y la consecuente erosión -hídrica o eólica- y desertificación. Si fuera necesario establecer una práctica prioritaria, esta sería el establecimiento de la pasturas en zonas áridas ya que constituyen barreras contra la desertificación y la erosión.

La forma técnica de llegar a ello es por un incremento de la cobertura y la protección del suelo por medio de la biomasa en la superficie y el anclaje de esta biomasa por medio de un sistema radical bien desarrollado. Otros factores del manejo incluyen el pastoreo y el control del fuego los cuales son más difíciles de aplicar en razón de sus aspectos sociales. Los ingresos económicos y las políticas de mejoramiento pueden ser factores determinantes.

EL ÁREA ESTIMADA Y LOS BALANCES DE CAPTURA DE CARBONO

En IPCC (2000) se presentan muchas estimaciones y cálculos; Lal, (2000, 1997) y Batjes (1999) presentan información de la cual se han extraído algunos datos (Cuadro 8). Es necesario hacer la distinción entre cambios en el manejo de la tierra y cambios en el uso de la tierra.

En las tierras de cultivos, la evaluación de IPCC (2000) para los países en desarrollo -que corresponde, en general, a los países no incluidos aún en el Anexo 1 del Protocolo de Kyoto- es

CUADRO 8
Potencial de almacenamiento neto de carbono de actividades adicionales bajo el artículo 3.4 del protocolo de Kyoto (de IPCC, 2000)

Actividad (prácticas)	Grupo*	Área (10 ⁶ ha)	Adopción/conversión (% de área)		Tasa de ganancia de carbono (t C/ha/año)	Potencial (millones t C/año)	
			2010	2040		2010	2040
<i>a) Manejo mejorado dentro del uso de la tierra</i>							
Tierras cultivadas (menos labranza, rotaciones y cultivos de cobertura, manejo de la fertilidad, control de erosión, manejo del riego)	AI	589	40	70	0,32	75	132
	NAI	700	20	50	0,36	50	126
Arrozales (riego, fertilización química y orgánica, manejo de los residuos de las plantas)	AI	4	80	100	0,10	>1	>1
	NAI	149	50	80	0,10	7	12
Agrosilvicultura (mejor manejo de árboles en tierras cultivadas)	AI	83	30	40	0,50	12	17
	NAI	317	20	40	0,22	14	28
Tierras de pastoreo (ganado, plantas leñosas, manejo del fuego)	AI	1297	10	20	0,53	69	137
	NAI	2104	10	20	0,80	168	337
Bosques (regeneración del bosque, fertilización, elección de especies, menor degradación del bosque)	AI	1898	10	50	0,53	101	503
	NAI	2153	10	30	0,31	69	200
Tierras urbanas (plantación de árboles, manejo de residuos, manejo productos forestales)	AI	50	5	15	0,30	1	2
	NAI	50	5	15	0,30	1	2
<i>b) Cambio de uso de la tierra</i>							
Agrosilvicultura (conversión de tierra cultivada improductiva y tierras de pastoreo)	AI	~0	~0	~0	~0	0	0
	NAI	630	20	30	3,10	391	586
Restauración de tierras severamente degradadas (a cultivos, pasturas o bosques)	AI	12	5	15	0,25	>1	1
	NAI	265	5	10	0,25	3	7
Tierras de pastoreo (conversión de tierras cultivadas a pasturas)	AI	602	5	10	0,80	24	48
	NAI	855	2	5	0,80	14	34
Restauración de humedales (conversión de tierras drenadas a humedales)	AI	210	5	15	0,40	4	13
	NAI	20	1	10	0,40	0	1
<i>c) Almacenamiento de carbono fuera del lugar</i>							
Productos forestales	AI	n/d	n/d	n/d	n/d	210	210
	NAI	n/d	n/d	n/d	n/d	90	90
Totales	AI					497	1063
	NAI					805	1422
	<i>Global</i>					1302	2485

* AI: Países Protocolo de Kyoto, Anexo I (aprox. países industrializados). NAI: países no incluidos en Anexo I (aprox. países en desarrollo)

que las prácticas mejoradas de manejo podrían cubrir el 20 por ciento de la tierra (el 50 por ciento en el año 2040), con referencia a un área de 700 millones de hectáreas y una ganancia media de carbono de 0,32 t/ha/año.

En el caso de las tierras de pastoreo las cifras indican que un 10 por ciento (20 por ciento en 2040) de los 2 104 millones de hectáreas deberían estar involucradas en el mejoramiento de su manejo a una tasa de 0,80 t C/ha/año.

En el caso de la agrosilvicultura, 30 por ciento (40 por ciento en 2040) de los 317 millones de hectáreas podrían ser mejor manejadas a una tasa de 0,22 t C/ha/año [que es relativamente baja comparada con las estimaciones de Post y Kwon (2000)].

No parece ser realista la esperanza de mejorar los arrozales (tierras regadas/humedales) para la captura de carbono; la prioridad se debe dar a la reducción de las emisiones de metano. Las principales propuestas para el cambio de uso de la tierra conciernen la conversión de tierras cultivadas a agrosilvicultura o tierras de pastoreo, lo cual involucra grandes áreas. En el caso de los campos de arroz, regados o humedales, la captura de carbono no puede ser la justificación más importante para la restauración de los humedales. La restauración o la prevención de la degradación del suelo debe ser la principal prioridad tanto para las prácticas de manejo como para los cambios en el uso de la tierra.

Capítulo 5

Principales consecuencias e impacto de la captura de carbono

La captura de carbono y el aumento de la materia orgánica del suelo tendrán un impacto directo sobre la calidad y la fertilidad de los suelos. Habrá también efectos positivos importantes sobre el ambiente y la resiliencia y la sostenibilidad de la agricultura.

CALIDAD Y FERTILIDAD DEL SUELO

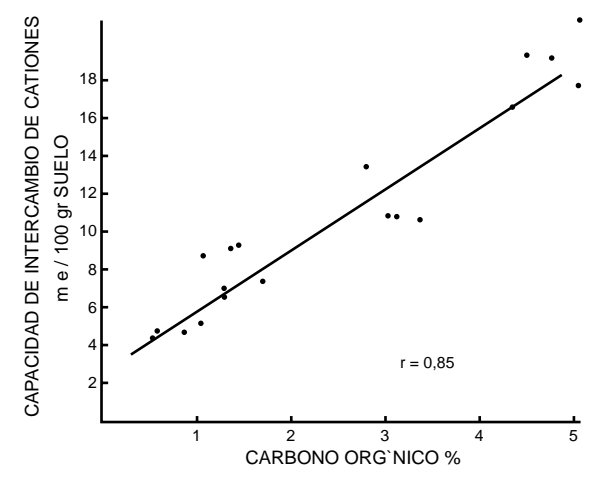
Como se mencionó anteriormente, la materia orgánica del suelo tiene funciones esenciales desde el punto de vista biológico, físico y químico del suelo. El contenido de materia orgánica es generalmente considerado como uno de los indicadores primarios de la calidad del suelo, tanto en sus funciones agrícolas como ambientales.

La materia orgánica es de especial interés en el caso de los suelos tropicales -excepto en los vertisoles- con arcillas de baja actividad que tienen una pobre capacidad de intercambio de cationes. La capacidad de intercambio de cationes aumenta en función del incremento de la materia orgánica (Figura 12). La biodisponibilidad de otros elementos importantes tales como el fósforo podrá mejorar y la toxicidad de otros elementos podrá ser inhibida por la formación de quelatos u otras uniones, por ejemplo, aluminio y materia orgánica (Robert, 1996a).

En una agricultura con bajo uso de insumos, el reciclaje de los nutrientes -N, P, K, Ca- por medio de la descomposición gradual de las plantas y los residuos de los cultivos es de importancia fundamental para la sostenibilidad (Sánchez y Salinas, 1982; Poss, 1991).

En relación a las propiedades físicas, la materia orgánica y los organismos vivientes asociados a la misma juegan un papel principal en la agregación del suelo en diferentes escalas de su organización (Tisdall y Oades, 1982; Robert y Chenu, 1991), tanto a micro- como a macronivel (Figura 13). La agregación y los procesos de captura de carbono están estrechamente asociados (Golchin *et al.*, 1994; Angers y Chenu, 1998). Muchas propiedades dependen de la estructura

FIGURA 12
Relación entre el carbono orgánico y la capacidad de intercambio de cationes en suelos experimentales seleccionados



del suelo y de su estabilidad, de la retención de agua y su liberación para las plantas, de la tasa de infiltración y de la resiliencia de la erosión y de otros procesos físicos de degradación.

En el caso de la erosión, se ha establecido una correlación entre la disminución histórica de la materia orgánica del suelo y el desarrollo de la erosión. Todos los tipos de manejo de los cultivos que capturan carbono favorecen la cobertura del suelo y limitan la labranza y de este modo previenen la erosión.

IMPACTOS AMBIENTALES

La captura de carbono en los suelos agrícolas se contrapone al proceso de desertificación por medio del papel que juega el incremento de la materia orgánica sobre la estabilidad de la estructura -resistencia a la erosión hídrica y eólica- y a la retención de agua, y al aspecto esencial de la cobertura de la superficie del suelo directamente por las plantas o por los residuos de las plantas -o cobertura muerta- para prevenir la erosión e incrementar la conservación del agua.

La materia orgánica, al incrementar la calidad del suelo, también tiene una función protectora al fijar los contaminantes -ya sean orgánicos como los pesticidas o minerales como los metales pesados o el aluminio- los cuales, en general, disminuyen en su toxicidad.

La calidad del aire está principalmente relacionada con la disminución de la concentración del CO₂ atmosférico, pero considerando también los otros gases de invernadero, en particular metano y óxido nitroso (CH₄ y N₂O). El principal factor que controla su génesis es la anaerobiosis -proceso de reducción del suelo- la cual está generalmente ligada a las condiciones hidromórficas. Cuando aumentan las pasturas o las tierras para pastoreo, la emisión de metano por el ganado debe también ser tomada en consideración.

En algunos ambientes y dependiendo de las condiciones climáticas -áreas húmedas- o propiedades del suelo -alto contenido de arcilla- puede ser formado N₂O. Por lo tanto, se debe hacer un cuidadoso balance de los distintas emisiones de gases.

El cultivo del arroz en tierras húmedas es el sistema de cultivos más complejo en relación a la captura de carbono. Si la materia orgánica se acumula en un suelo húmedo, también se forma CH₄. El efecto de invernadero del metano es mucho mayor que el del CO₂. La estrategia más común para prevenir la formación de metano es disminuir el período de inundación, de modo que la materia orgánica esté menos protegida de la mineralización y puedan ser emitidos CO₂ y N₂O o NH₄. Por estas razones, parecería muy difícil, por el momento, manejar simultáneamente la producción de arroz en tierras húmedas y la captura de carbono.

Los últimos hallazgos en la agricultura de conservación respecto a los sistemas arroz-trigo son positivos; por ejemplo, los rendimientos del arroz pueden ser mantenidos o mejorados sin saturación de agua, encharcamiento o reducción del suelo y con grandes ahorros de agua en el período de crecimiento del arroz. Este nuevo enfoque ha sido convalidado por los agricultores en varios miles de hectáreas en países como India y Brasil.

Las tierras húmedas tienen condiciones anaeróbicas similares con menor emisión de CH₄ que los campos de arroz húmedos y un mayor potencial de secuestro de carbono que puede llevar a la formación de turba. Esto tiene también otras ventajas ambientales importantes que deben ser protegidas; no es realista, sin embargo, esperar rápidos incrementos.

La calidad del agua también es mejorada por una disminución de la escorrentía, de los contaminantes y de la erosión. En el caso específico de la labranza de conservación, también se evita o minimiza una fuerte mineralización de la materia orgánica con la subsecuente formación de nitratos.

Los cambios en el uso de la tierra y en su manejo también tienen un efecto importante sobre la distribución de la precipitación pluvial entre escorrentía y almacenamiento o infiltración, con un aumento de la última en el caso de las tierras de pastoreo, bosques y labranza de conservación con cobertura de suelo. La cobertura del suelo previene la erosión; por lo tanto, si hubiera alguna escorrentía, el agua estaría libre de partículas asociadas con contaminantes - elementos traza, PO_4 . La contaminación a distancia por productos solubles también disminuirá en relación directa con la menor escorrentía. Esta es una de las bases de la ecocondicionalidad en la *US Farm Bill* desde 1996. Con tales cambios en las prácticas agrícolas puede ser enfrentado el desafío de la calidad del agua. Una vez que los cambios hayan tenido lugar en grandes áreas, también decrecerá la severidad y frecuencia de las inundaciones.

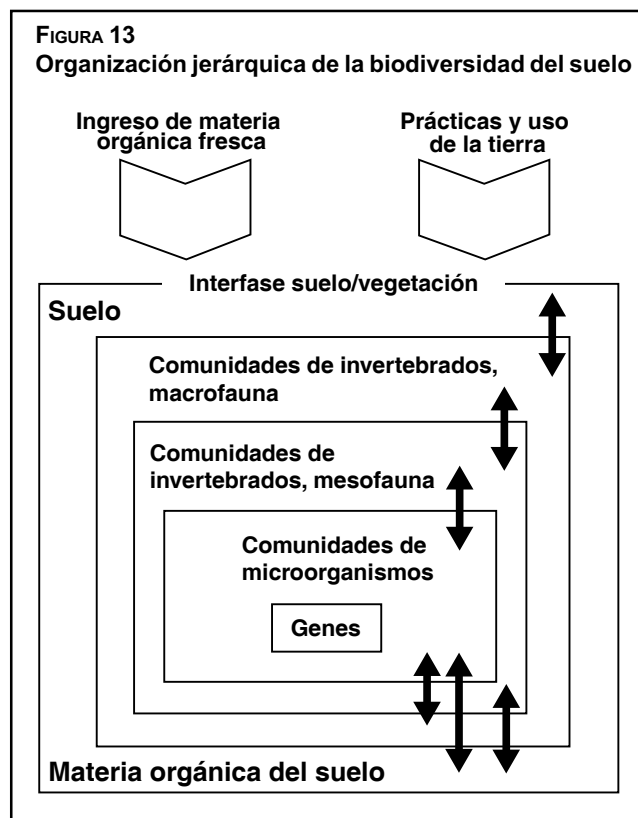
El efecto general del incremento de la materia orgánica del suelo es un mejoramiento de la capacidad amortiguadora y de la resiliencia del suelo a diferentes tipos de degradación o estrés.

BIODIVERSIDAD Y FUNCIÓN BIOLÓGICA DEL SUELO

Los cambios en la biodiversidad son evidentes cuando ocurre la deforestación. En el caso de la reforestación, dependerán del tipo de bosque establecido. Los sistemas agro-forestales bien manejados involucran una amplia gama de biodiversidad. Por lo general, la biodiversidad de los mamíferos es preservada en el caso de los bosques, el número de especies de aves se reduce a la mitad y las especies vegetales disminuyen en un tercio (de 420 a 300), (IPCC, 2000). Likey, (ICRAF) se refiere a un mosaico de manchas, cada una de ellas compuesta de muchos nichos, o sea un sistema favorable para la biodiversidad.

En el pasado, los sistemas agrícolas más intensivos llevaron a una sensible disminución de la biodiversidad, junto a una paralela reducción de la materia orgánica debida sobre todo a la labranza y al uso de pesticidas (Rovira, 1994).

En el caso de las tierras de cultivo, el aumento de la biodiversidad en relación con el incremento de la materia orgánica se basa, sobre todo, en el aumento de la biodiversidad del



suelo (Copley, 2000). La Figura 13 presenta una organización jerárquica de la biodiversidad del suelo, la cual depende directamente del abastecimiento de materia orgánica fresca y de las prácticas agronómicas. Esta biodiversidad varía desde los genes hasta los microorganismos, la fauna y la biodiversidad encima de la tierra. La cantidad de bacterias puede aumentar en forma exponencial, de 10^3 a 10^{12} , tan pronto como la materia orgánica sea abundante. La labranza cero favorecerá el desarrollo de hongos los cuales son sumamente activos en la agregación del suelo. Sin embargo, solo 5 a 10 por ciento de las especies de la microflora del suelo son conocidas y en la actualidad sería posible investigar, gracias a las nuevas técnicas moleculares, la evaluación de la biodiversidad específica o interespecífica de los microorganismos.

Cuando la materia orgánica fresca -residuos de las plantas o plantas de cobertura- está presente en la superficie del suelo, habrá un incremento de las distintas categorías de la fauna, sobre todo de los *descomponedores*. Las cadenas alimenticias asociadas a los detritos serán estimuladas (Hendricks *et al.*, 1986) -bacterias, hongos, microartrópodos, nematodos, enquitreidos-macroartrópodos. Las lombrices de tierra, las termitas y las hormigas, que son los principales grupos que componen la macrofauna (>1 cm) a menudo son llamados *ingenieros del suelo* en razón de la función que tienen sobre la porosidad -bioporos- y estructura del suelo; su número se incrementa paralelamente al aumento de la materia orgánica con una disminución del disturbio del

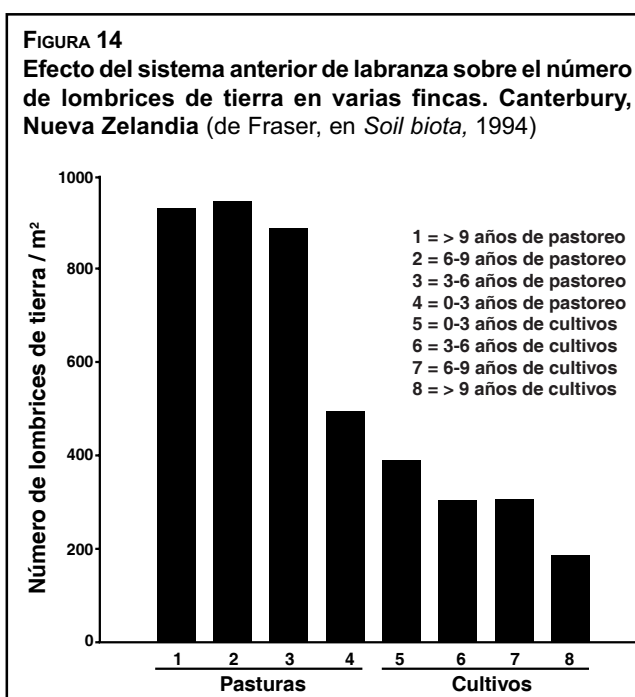
suelo, o sea la no labranza (Figura 14). Son buenos indicadores de la calidad del suelo (Lavelle, 2000; Lobry de Bruyn, 1997) y tienen un papel fundamental en la agricultura de conservación. Son, por ejemplo, indispensables para asegurar la distribución a través del suelo -incluso a más de un metro de profundidad- de la materia orgánica acumulada en la superficie.

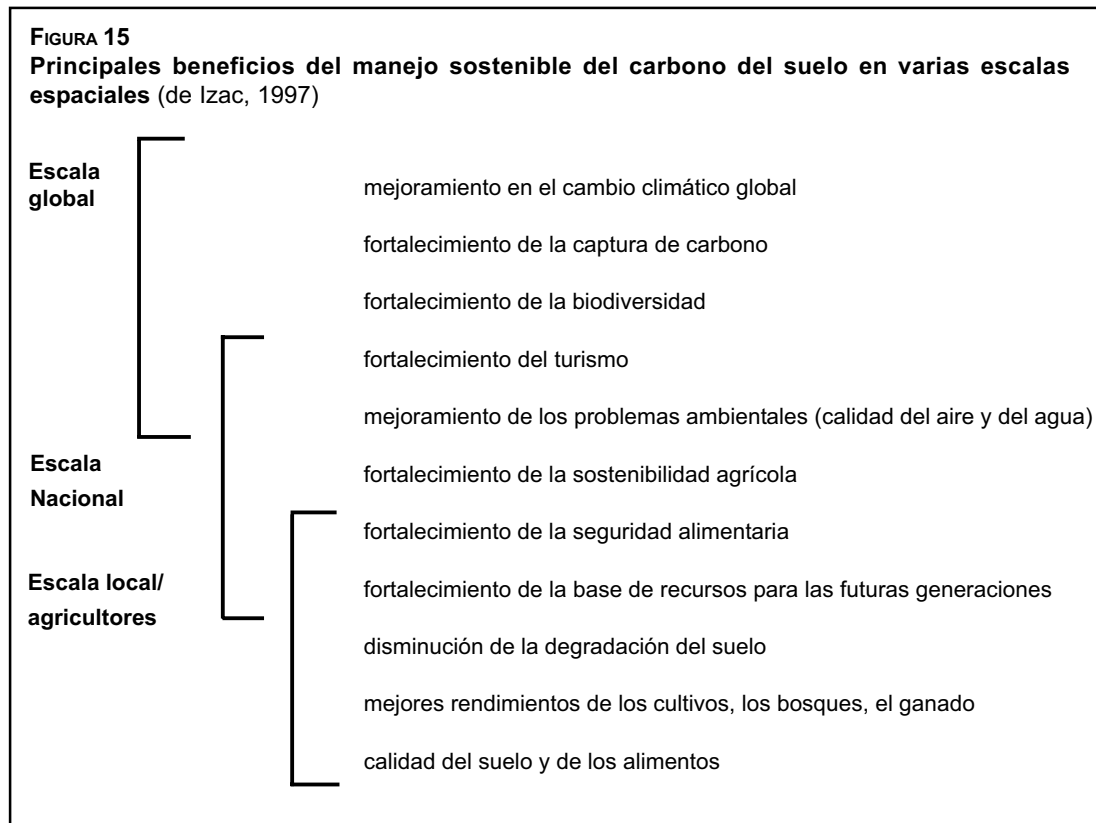
Un aumento en la captura de carbono causa un incremento en la biodiversidad activa y un funcionamiento más efectivo de los elementos biológicos del suelo, lo cual es un proceso relativamente lento en la mayoría de los suelos agrícolas. La biodiversidad de todo el agro-sistema (vegetación, aves, etc.) también depende del tipo de manejo.

Todas las consecuencias y los beneficios de este enfoque también deberían ser apreciados en relación con la sostenibilidad de la agricultura, incluso con respecto a los depósitos de genes y el control biológico de las plagas.

BENEFICIOS PARA LOS AGRICULTORES

Los agricultores no siempre son sensibles a los problemas de la calidad del suelo, salvo que haya otras ventajas más tangibles. La conservación del suelo y la prevención de la degradación





de la tierra se están percibiendo cada vez más como beneficios concretos. La materia orgánica del suelo es también equivalente a una cierta cantidad de nutrientes y puede retener agua suplementaria. Todos estos beneficios han sido evaluados en el caso de los agricultores estadounidenses (Lal *et al.*, 1998a).

En relación con la labranza de conservación y la no labranza, los agricultores pueden obtener ganancias por una reducción del tiempo de trabajo, energía y costo de los materiales: estas son ventajas directas que deben ser evaluadas. De cualquier manera, los agricultores deberán controlar las plagas, pero con una mayor calidad del suelo, los cultivos serán generalmente más sanos y tendrán mayor capacidad de recuperación.

Los sistemas agroforestales bien manejados pueden ser viables desde un punto de vista económico. Algunos ejemplos bien conocidos comprenden el café, el cacao, la pimienta, los árboles frutales o las palmas. Estos sistemas presentan ventajas, si bien puede no haber incrementos inmediatos en el rendimiento, sobre todo en los cultivos más comunes.

Por lo tanto, para llegar a una posición ventajosa, se deberán agregar otros beneficios. Estos pueden provenir de distintos orígenes tales como convenios o intervenciones sobre políticas (Izac, 1997), basados en beneficios como los que se citan en la Figura 15.

Es fundamental que sea otorgado un valor económico -como para los bienes comercializables- a la cantidad de carbono capturado por medio de la aplicación del Protocolo de Kyoto o de un probable tratado Post-Kyoto y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (CMD).

Los *grupos de comercialización* de carbono o sistemas de intercambio aparecieron por primera vez en el año 2000. Hay tres formas de calcular el valor del carbono en esos sistemas

de comercialización e intercambio: i) la primera opción es adjudicar un valor calculado del costo externo de cada tonelada de carbono emitido a la atmósfera, evaluando los costos del daño, de la mitigación y de la adaptación; ii) la segunda opción es calcular el costo de implementación de proyectos dirigidos a un objetivo preciso tal como el Protocolo de Kyoto; iii) la tercera opción consiste en identificar que sectores comerciales están en condiciones de pagar a terceros por las emisiones de carbono -las compañías están en efecto buscando soluciones contra el riesgo de futuros pagos obligatorios que puedan eventualmente surgir por medio de nuevas regulaciones contra las emisiones de carbono.

El costo para la comunidad de las emisiones de CO₂ ha sido estimado en Europa en alrededor de 95 dólares EE.UU. por tonelada/C de acuerdo con los modelos *ExternE* y *Open Fund* (Pearce *et al.*, 1996; Eyre *et al.*, 1997; Holland *et al.*, 1999). Este valor es mayor que los 20 a 28 dólares EE.UU. por tonelada estimados a principios de la década de 1990 (Fankhauser, 1994; Sala y Paruelo, 1997).

Se han establecido recientemente un cierto número de sistemas de intercambio o canje de carbono en los cuales los valores del crédito de carbono se establecen a valores mucho menores que los costos reales externos. Estos varían ampliamente -entre 1 y 38 dólares EE.UU. por tonelada de carbono- si bien los valores más comunes se encuentran entre 2,50 y 5,00 dólares EE.UU. Estos valores monetarios por la tonelada de carbono son considerablemente menores que algunas estimaciones optimistas hechas en los Estados Unidos de América de 100 dólares EE.UU. por tonelada.

Para que ocurra un verdadero impacto en el cambio climático los sumideros deben ser permanentes. Si la tierra bajo agricultura de conservación es labrada, todas las ganancias de carbono y de materia orgánica del suelo se pierden. Esto presenta un desafío importante para los sistemas de intercambio ya que no existen, en estas condiciones, una clara reducción de las emisiones en forma permanente ni la captura permanente de una tonelada de carbono ya que estas operaciones se pueden revertir en el tiempo. Los sistemas de intercambio o canje deben, por lo tanto, ser dirigidos al punto del riesgo de la permanencia y casi seguramente adoptar límites más bajos para la captura potencial del carbono y para los valores monetarios asignados. El riesgo de revertir la operación será más bajo durante el período limitado por el contrato entre el comprador y el vendedor de créditos de reducción de carbono, pero la permanencia será garantizada solamente si hay cambios a largo plazo en el comportamiento y en las actitudes. Con el correr del tiempo, los procedimientos y los hallazgos científicos también pueden evolucionar proporcionando más claridad a los términos de intercambio.

Los sistemas de intercambio y canje ofrecen nuevas opciones en forma significativa, pero también es claro que el solo intercambio de emisiones no puede solucionar los problemas del cambio climático y, por lo tanto, son necesarios cortes substanciales en las emisiones. También es posible llegar a resultados insatisfactorios en las primeras etapas de los sistemas de intercambio, tales como la conversión de bosques nativos a monoculturas forestales de rápido crecimiento de modo de obtener ganancias por los créditos de emisiones o arando las pasturas para reconvertirlas a sistemas de labranza cero aptos para la captura de carbono.

Algunos sistemas de intercambio se resumen en un reciente trabajo (Pretty *et al.*, 2001). Muchos de estos trabajos pertenecen al sector privado y probablemente no sean afectados por la falta de progreso de los Protocolos de Kyoto.

Por lo tanto, las llamadas actividades adicionales del Artículo 3.4 del Protocolo de Kyoto deberían ser aprobadas en la próxima Conferencia de las Partes (COP) y aplicadas a los países en desarrollo. Este es el verdadero desafío. El sistema también necesita el desarrollo de políticas

intergubernamentales, de políticas gubernamentales de desarrollo con un enfoque participativo (Benites *et al.*, 1999) y de acciones técnicas de apoyo. En los países europeos y en los Estados Unidos de América, las prácticas que capturan carbono en el suelo deberían ser consideradas para ser financiadas con fondos agroambientales.

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Mientras que un aumento del contenido atmosférico de gases de invernadero está llevando a un cambio climático, también ocurrirán numerosos efectos complejos, contrastantes y opuestos (Brinkman y Sombroek, 1996).

Todos los resultados experimentales demuestran que un aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera induce un incremento de la biomasa o de la Red Primaria de Producción por medio de la fertilización con carbono, con un papel muy importante sobre la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas. La ganancia en la fijación de CO₂ podría ser importante. El incremento en la productividad medido a causa de la duplicación de la concentración del CO₂ -predicha para el año 2100- es de cerca del 30 por ciento para las plantas C3. Otro efecto importante del aumento del CO₂ es la disminución de la transpiración de las plantas a través de los estomas lo cual redundará en una mayor eficiencia en el uso del agua (WUE), sobre todo en las plantas C4. En lo que se refiere al agua, hay un efecto neto favorable del CO₂ sobre la reducción de la transpiración de las plantas (Gregory *et al.*, 1998). Evidentemente, para llegar a un aumento de rendimiento en el campo, también deben ser satisfechos otros requerimientos de las plantas como el agua y los nutrientes disponibles.

En lo que se refiere al ciclo del carbono, habrá una mayor captura de carbono por la biomasa aérea y un correlativo ingreso de carbono en el suelo a partir de los residuos de las plantas y del crecimiento y la muerte de las raíces más finas. Los compuestos de las raíces tienen una mayor relación C/N y son más estables.

Otro factor que juega un papel importante en la captura de carbono es la temperatura, la que podría aumentar en algunas partes del globo terráqueo. Tal incremento podría provocar una mayor tasa de mineralización de la materia orgánica por los microorganismos y una mayor tasa de respiración de las raíces. Este efecto de la temperatura sobre la mineralización podría ser significativo en los países fríos, donde la temperatura es un factor limitante y donde puede ser esperado un incremento de las emisiones de CO₂. Sin embargo, en la mayor parte del mundo es de esperar un aumento de la captura de carbono (van Ginkel *et al.*, 1999).

Para estimar el efecto del cambio climático sobre la captura de carbono pueden ser usados modelos. Los resultados de muchos estudios recientes confirman el incremento de la tasa de crecimiento de los bosques en las zonas templadas y en los países nórdicos. En lo que se refiere a los bosques tropicales, existen algunas medidas hechas en la Amazonía donde se ha encontrado un aumento de la biomasa (Phillips *et al.*, 1998) de 0,62 t C/ha/año, lo cual para un área de 7 000 millones de hectáreas significa una captura de carbono de Gt 0,44 C/año. La causa de esto no es simple, ya que la influencia de *El Niño* está probablemente involucrada en el aumento de la humedad del área.

Capítulo 6

Propuestas

¿CUÁLES SON LAS PROPUESTAS MÁS VÁLIDAS PARA LA CAPTURA DE CARBONO?

En referencia al Artículo 3.3 del Protocolo de Kyoto que concierne la forestación, la reforestación y la deforestación, y al período 2008 a 2012 para los países mencionados en el Anexo 1 del Protocolo, el balance entre las dos primeras actividades -46 millones de toneladas de C/año- y la tercera -deforestación, 90 millones de toneladas C/año- es negativo. El pronóstico de la FAO para la deforestación en los países en desarrollo -sin incluir China- también es de 90 millones de hectáreas en los próximos 10 años. Por lo tanto, la preservación de los bosques debe ser una prioridad en todos los países.

Si se considera la aplicación del Artículo 3.4 (Cuadro 8), referido al mejor manejo y al cambio en el uso de la tierra, los países en desarrollo tienen el mayor potencial para el secuestro de carbono, excepto en el manejo de los bosques (100 millones t C en los países desarrollados, 70 millones t C en los países en desarrollo). El manejo de las tierras cultivadas (125 millones t C/año) o de las tierras de pastoreo (240 millones t C/año) y el cambio en el uso de la tierra con su conversión a agrosilvicultura (390 millones t C/año) son de gran interés para el secuestro de carbono. El total representa 0,53 Pg o Gt de carbono secuestrado por año, una cifra significativa, independientemente de otras ventajas, que equivale al 10 por ciento del total de las emisiones por la combustión de los combustibles fósiles. Esto debería ser considerado cuando se discuta cualquier actividad adicional o la extensión del protocolo de Kyoto o de un eventual acuerdo post-Kyoto dirigido a los países en desarrollo. Si se extendiera el área de la captura de carbono a tierras áridas y tropicales se podría llegar a capturar 1,5 Pg/C/año.

Batjes (1996) discute el potencial de captura de carbono especialmente en referencia al estado de degradación de la tierra. El enfoque distingue entre la degradación ligera y moderada (que puede ser restaurada por un mejor manejo de la tierra) y la degradación fuerte y extrema que requiere trabajos específicos de restauración, incluyendo la conversión a nuevos usos de la tierra.

La degradación fuerte está estrechamente ligada a la deforestación (113 millones de hectáreas, Cuadro 7). La conversión a agrosilvicultura (Cuadro 8) en áreas más húmedas y a tierras de pastoreo en zonas áridas pueden ser soluciones sostenibles.

Para otros tipos de suelos degradados, se deben desarrollar proyectos usando *biorremedios* por medio de las plantas. Para las tierras de relleno y los suelos fuertemente contaminados es posible usar especies adaptadas a altas concentraciones de metales tóxicos. Las especies adaptadas a suelos salinos tales como *Prosopis juliflora* tienen distintos usos y pueden capturar considerables cantidades de carbono (12 t/ha).

Las tierras moderadamente degradadas (910 millones de hectáreas), donde el principal proceso de degradación es la erosión, deben ser consideradas primeramente para un mejor manejo. La erosión eólica, que ocurre sobre todo en las tierras áridas, puede ser prevenida por medio de la agricultura de conservación o por un mejor manejo del pastoreo. Para prevenir la

erosión hídrica que ocurre sobre todo en la parte central de América del Sur o África, en las áreas tropicales, pueden ser usadas la agricultura de conservación y la agrosilvicultura. Considerando los pronósticos del IPCC (Cuadro 8), podrían ser mejoradas un mínimo de 50 millones de hectáreas, y si los incentivos fueran más interesantes esa área podría incrementarse. La tasa anual de captura de carbono puede ser mayor de 0,36 t/ha (Steward, 1995) y en las tierras de pastoreo un mejor manejo en 168 millones de hectáreas pudiera ser un objetivo más ambicioso.

¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES IMPLICANCIAS PARA LA AGRICULTURA?

Tales propuestas tienen considerables consecuencias para la agricultura, pero debe quedar claro que hay buenas opciones para el manejo de los cultivos.

Las tierras cultivadas y el componente cultivos en los sistemas agroforestales

El primer experimento importante sobre labranza de conservación se llevó a cabo en los Grandes Llanos de Estados Unidos de América, en un clima continental templado. Los resultados fueron exitosos para el control de la erosión pero algo menos para la captura de carbono.

Las variantes de la agricultura de conservación se difunden ampliamente: son aplicadas por los agricultores en más de 60 millones de hectáreas en muchos países, incluyendo Brasil, Argentina, Estados Unidos de América, Australia, India y están siendo validadas también en varios países de África. Estas prácticas incluyen el manejo agrobiológico del suelo y de los sistemas de producción (CIRAD, 1996, 1998, 1999).

Los principios básicos son:

- labranza cero (o labranza mínima);
- cobertura permanente del suelo con vegetación (cultivos comunes y plantas adicionales) o residuos de plantas;
- siembra directa a través de la cobertura permanente del suelo o de los residuos de los cultivos;
- producción de biomasa y cobertura del suelo con materiales vegetales usando especies adaptadas (ver Cuadro 6).

Estos sistemas conllevan una alta tasa de captura de carbono porque combinan los efectos de la labranza cero con un ingreso máximo de materia orgánica en forma de residuos de los cultivos o de cultivos de cobertura. Es preferible la cobertura por plantas *in situ* antes que traer materiales de otros lugares en razón del aporte adicional que hacen las raíces del cultivo además del consumo de energía para transportar la cobertura necesaria; esto también implica la pérdida de carbono en otros lugares. Las mismas prácticas se aplican a los cultivos incluidos en los sistemas agroforestales. Desde el momento en que es posible agregar la captura de carbono proporcionada por los árboles, la combinación resulta ser un sistema muy efectivo.

Si el método pasara a tener un uso más generalizado podrían surgir algunos problemas que deberían ser solucionados. Uno de los posibles problemas es el control de las malezas en el primer o segundo año de la no labranza donde puede ser necesario el uso de algunos herbicidas. El glifosato tiene ahora un uso generalizado en virtud de su efectividad para el control de gramíneas y especies perennes. Sin embargo, aún es necesario un estudio cuidadoso sobre la

acumulación, tiempo de residencia y ecotoxicidad de esos productos en los suelos (García Torres, 1997).

Otros problemas técnicos, sociales y económicos pueden limitar la generalización de estas prácticas en África donde hay competencia por el material vegetal entre el uso que hace del mismo la ganadería extensiva y el uso que se hace para proteger el suelo. Una buena asociación de cultivos y ganado puede ser establecida solo si hay un incremento en la producción de biomasa, por ejemplo, con abonos verdes.

EL PROYECTO FAO-FIDA Y EL MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO (CDM)

Continuando con el primer programa de colaboración para la implementación de la Convención para el Combate de la Desertificación (CCD), dentro del marco de un *Memorandum de Entendimiento*, la FAO y el FIDA iniciaron en 1999 un segundo proyecto titulado *Prevención de la Degradación de la Tierra, Fortalecimiento del Suelo y de la Biodiversidad de las Plantas y Captura de Carbono por medio del Manejo Sostenible y el Cambio de Uso de la Tierra*.

El primer objetivo de este proyecto es correlacionar la seguridad alimentaria, la captura de carbono y la lucha contra la desertificación y demostrar que la aplicación del Protocolo de Kyoto o de un tratado post-Kyoto está relacionada con las Convenciones sobre Desertificación y Biodiversidad. En las actas de una consulta de expertos llevada a cabo en Roma en 1999, y en los trabajos de Koohafkan, Mansuri y Young se muestra la clara relación que existe entre la captura de carbono y la biodiversidad, la prevención de la degradación de la tierra y la desertificación (FAO/IFAD, 1999).

El segundo objetivo del proyecto es alentar la supervisión y las mediciones en el campo. En los distintos sistemas de uso de la tierra existen tasas de captura de carbono muy variables. El proyecto está analizando escenarios cuantitativos para diferentes zonas de América Latina y el Caribe (dos lugares en México, un lugar en Cuba), incluyendo los beneficios para los agricultores -rendimientos, reducción de costos, ahorro de trabajo, otros beneficios- para la conversión a distintos tipos de uso de la tierra. Una de las conversiones más importantes es la alternativa a la agricultura de roza, tumba y quema. El uso de diferentes modelos, sobre todo *Century* (Parton *et al.*, 1988, 1994) y *Roth-C 26* (Coleman y Jenkinson, 1995) permiten la estimación de la dinámica del carbono y la cantidad de materia orgánica necesaria para asegurar una producción sostenible con la optimización de otros objetivos como una degradación mínima de la tierra y una máxima conservación de la biodiversidad.

Como seguimiento a este proyecto, en agosto 2001 se firmó una carta de entendimiento entre la FAO y el GM sobre un programa normativo para *Mecanismos para los Incentivos para la Captura de Carbono para Combatir la Degradación de la Tierra y la Desertificación*. El objetivo principal del programa es la recolección, evaluación y elaboración de materiales informativos producidos por numerosos proyectos y estudios de caso llevados a cabo en diferentes áreas áridas del mundo. El Protocolo de Kyoto también proporciona diferentes oportunidades para financiar proyectos concretos, por ejemplo a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio (CDM) o de actividades basadas en proyectos (LULUCF), que hacen referencia preferentemente al sector forestal. Otros temas son los beneficios económicos de la menor labranza (Canadá) o de la agrosilvicultura (México, Guatemala).

Algunos proyectos están relacionados con la supervisión de la biomasa de los bosques para lo que se han desarrollado dos métodos. El primero de ellos está basado en parcelas permanentes

que proporcionan buenos resultados estadísticos (ver la propuesta más abajo). El segundo método utiliza en diversas formas sensores remotos, imágenes satelitales y fotografías aéreas a baja altura usando GPS. También existen posibilidades para desarrollar proyectos con fondos del *Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM)* o del Banco Mundial.

UNA PROPUESTA PARA UN SISTEMA DE SUPERVISIÓN DE TIERRAS PARA VERIFICAR LA CAPTURA DE CARBONO

En el caso en que se decidiera una extensión del Protocolo de Kyoto o se establezca un tratado post-Kyoto será necesario contar con herramientas para la supervisión, la verificación o la certificación, de modo de poner en claro los cambios en los depósitos de carbono en relación con el tipo de suelo, las condiciones climáticas, la ocupación de la tierra y las diferentes prácticas de manejo de la tierra. Los países europeos, entre ellos Francia y Gran Bretaña, están estableciendo sistemas de supervisión; sin embargo, para satisfacer los requerimientos del Artículo 3.4 del protocolo de Kyoto (*incertidumbres, transparencia, verificabilidad*), será necesaria la organización de encuestas sobre los recursos de suelos/tierras en los países en desarrollo para llevar a cabo la supervisión en forma sistemática.

Ya en 1991 se discutió la necesidad de contar con estas informaciones (Young, 1991), pero hasta el momento esto no ha sido hecho. La propuesta es para establecer una red de supervisión de la tierra la cual represente el componente permanente del ecosistema, con la elección de una célula geográfica sistemática. La escala puede ser discutida tomando en consideración aspectos financieros y la heterogeneidad de la tierra. En Europa, se han elegido células de 16 x 16 km (Francia) o de 8 x 8 km (Gran Bretaña), las que tienen en consideración al mismo tiempo la diversidad de los suelos y la ocupación de la tierra.

Las parcelas permanentes georreferenciadas son el apoyo para la descripción de los perfiles, el muestreo para los análisis y la conservación de las muestras. Debe ser hecha la descripción actual y anterior de la ocupación de la tierra y de las prácticas agrícolas. Es necesario considerar que un plazo de cinco a diez años es el período mínimo apropiado para supervisar cambios en los depósitos de carbono. La red debería estar unida a una base de datos digitales relacionados con datos de suelos y ocupación de la tierra pero también con otras condiciones biofísicas o socioeconómicas que permitan la determinación de la distribución espacial en distintas escalas –nacional, regional- y de las diferentes implicaciones (sistema de información geográfica). Los problemas específicos de la determinación del punto de partida o de las parcelas de referencia que son presentados por IPCC, pueden ser fácilmente resueltos.

Un proceso similar de supervisión en una célula de 16 x 16 km ha sido desarrollado para la Red Europea de Sanidad Forestal y ha sido recientemente usada para estimar el almacenamiento del carbono por el Ecosistema Forestal de Francia. En este caso, tanto el carbono presente en la biomasa como el carbono presente en el suelo fueron determinados por la descomposición de sus componentes -residuos, raíces. Tal sistema de supervisión puede ser útil para varios usos: captura de carbono, calidad y degradación del suelo, contaminación del suelo y del agua, sanidad forestal, cambios en la biodiversidad y otros. Por lo tanto, junto a las medidas de los cambios en la captura de carbono, otros beneficios además de las variaciones en rendimiento, pueden ser evaluados en relación con una menor degradación del suelo -erosión, desertificación- o un incremento de la biodiversidad.

Unos pocos lugares pueden ser seleccionados por ecorregiones y ocupación de la tierra con diferentes prácticas y ser supervisados con más equipos a fin de obtener una evaluación más

detallada de las existencias de carbono -por ejemplo, usando isótopos de carbono que permitan la identificación de la fuente de materia orgánica en el caso de la conversión del uso de la tierra de C3 a C4 o viceversa- o para medir los flujos del carbono. De esta manera, deben ser establecidas relaciones con redes tales como Euroflux -para forestales- o la Iniciativa de Observación Terrestre (observación del carbono terrestre).

Los sensores remotos constituyen una herramienta sumamente útil para extrapolar los datos y mapear la cubierta de vegetación y de uso de la tierra pero no pueden reemplazar la necesidad de datos reales medidos sobre los cambios en las existencias de carbono en el suelo.

Puede ser propuesto un conjunto de métodos analíticos -estándares ISO- para los análisis más simples -total de carbono orgánico y densidad total- los cuales permiten el cálculo de depósitos, o para los elementos más complejos -distinción entre compartimientos de carbono o medidas de los cambios en las propiedades- que permitan evaluar las causas y los efectos principales. El uso de geoestadísticas ayudará en la extrapolación espacial de los resultados.

¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES DEFICIENCIAS?

Hay varios problemas importantes que deben ser resueltos y también faltan datos de campo sobre los diferentes factores que controlan el nivel de carbono en el suelo en períodos de 20 a 50 años, tales como: tipo de suelo, condiciones climáticas, uso de la tierra y prácticas agrícolas; por ejemplo:

- ¿cuál es el máximo de captura de carbono obtenido en esas diferentes condiciones?;
- ¿qué tipos de compuestos del carbono son capturados, qué tiempo de residencia y qué función tienen en el suelo?;
- ¿cómo puede ser evaluado, cualitativa y cuantitativamente, el aporte de materia orgánica al suelo por parte de las raíces?;
- ¿cómo pueden ser obtenidos buenos datos para la validación y la aplicación de los modelos de carbono?;
- ¿cómo pueden ser generalizados los datos provenientes de la supervisión a escalas nacionales y regionales?;
- son necesarios datos económicos, especialmente para los pequeños agricultores;
- funcionamiento de la materia orgánica, la biodiversidad y la biología del suelo;
- ¿cómo puede ser manejado el ingreso y la dinámica de la materia orgánica? (Fernández *et al.*, 1997; Heal *et al.*, 1997);
- ¿qué problemas pueden aparecer después de un cierto período: cambios en las propiedades físicas, otras emisiones de gases de invernadero, incidencia de plagas?;
- necesidad de tomar en consideración los flujos de otros gases de invernadero (N_2O y CH_4);
y
- enfoques ecológicos y agricultura sostenible.

NUEVOS PROYECTOS Y PERSPECTIVAS

Después de la última reunión de la FAO/GTZ sobre la verificación de las existencias de carbono e intercambio a nivel de países (FAO/GTZ, 2001) parece ser necesario establecer puntos de referencia en los países en desarrollo para la supervisión y la evaluación. Tales puntos de referencia serán propuestos en Brasil donde existen muchos experimentos históricos - cronosecuencias- relacionados con la deforestación y el desarrollo de tierras de pastoreo o sistemas de cultivo. Tales lugares podrían ser usados para establecer metodologías y modelos propuestos por el IPCC y adaptarlos a los países tropicales.

Usando algunas técnicas específicas -isótopos de carbono, fraccionamiento de la materia orgánica- será posible obtener un mejor conocimiento del efecto de distintas prácticas de manejo sobre la captura de carbono. Algunas recomendaciones y prácticas generales serán formuladas y publicadas en una *Guía para la evaluación de las existencias de carbono en los suelos*.

En los mismos lugares deberían ser medidos los efectos de la captura de carbono sobre las propiedades y la biodiversidad del suelo de modo de evaluar completamente los beneficios para el sistema.

En el año 2000 se creó una nueva red internacional, la DMC o Sistemas de Siembra Directa-Sistemas Basados en la Cobertura-Labranza de Conservación, que incluye ahora 60 instituciones nacionales e internacionales. El CIRAD se ha afiliado a esta red y, con fondos de la cooperación francesa, estableció un plan de acción en varios países en desarrollo -Brasil, Laos, Madagascar, Malí, Túnez- donde serán probadas distintas prácticas agrícolas midiendo las existencias y los flujos de CO₂ y las emisiones de N₂O en los puntos de referencia.

El gobierno de Alemania a través de la GTZ (Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit) ha establecido una colaboración con la Red Africana de Labranza. El Banco Mundial está fuertemente involucrado en muchos programas de difusión y extensión sobre siembra directa y prácticas asociadas, sobre todo en Brasil. En Pakistán, en febrero 2001 se llevó a cabo una reunión sobre agricultura de conservación en sistemas arroz-trigo. Otra reunión sobre agricultura de conservación se llevó a cabo en España en octubre 2001.

El proyecto sobre *Evaluación de la Degradación de las Tierras Áridas* (LADA) está siendo implementado por la FAO con el *Fondo para el Medio Ambiente Mundial* de PNUMA; el proyecto está dirigido a asistir al desarrollo de las tierras áridas proporcionando mejor información sobre la degradación de la tierra.

CONCLUSIÓN

El desarrollo de la agricultura durante los últimos siglos y décadas ha implicado el consumo de las existencias de carbono de los suelos creadas durante un período de larga evolución. En muchas de las tierras cultivadas, sobre todo en las regiones áridas y semiáridas, esto ha llevado a una reducción de la productividad de la tierra debido a la degradación de la tierra y a la desertificación. Ahora es necesario invertir esa tendencia, lo que se ha demostrado posible pero solamente si se cambia el tipo de agricultura. El protocolo de Kyoto y los acuerdos que se anticipan post-Kyoto favoreciendo la captura de carbono en los suelos son buenas oportunidades para facilitar este proceso. Los suelos pueden secuestrar cerca de 20 Pg/ha de carbono en 25 años, más del 10 por ciento de las emisiones antropogénicas. Al mismo tiempo esto proporciona otros beneficios importantes para el suelo, los cultivos y la calidad del ambiente, para la prevención de la erosión y de la desertificación y para el fortalecimiento de la biodiversidad.

La agricultura, las tierras de pastoreo y las sabanas tienen el potencial para almacenar carbono en el suelo y los habitantes del globo tienen gran necesidad de prácticas agrícolas que mejoren el almacenamiento del carbono y la productividad.

La captura de carbono es una promesa para presentar opciones totalmente favorables y nuevos beneficios en las comunidades de agricultores en zonas áridas. La atención de los gobiernos debe ser dirigida a estos beneficios potenciales y a la necesidad de iniciar la recolección de datos y el análisis de las existencias y los flujos del carbono, en escala piloto, en diferentes sitios seleccionados.

Estos beneficios resultan del hecho que la materia orgánica es un elemento clave en los suelos y que determina una serie -o cascada- de propiedades o funciones relativas a las propiedades del suelo, el efecto amortiguador, la capacidad de recuperación y la sostenibilidad. La biodiversidad depende del contenido de materia orgánica y su aumento en el suelo permitirá nuevas funciones. Los *ingenieros del suelo* -la microfauna- tomarán a su cargo, por ejemplo, algunas funciones como la labranza. Este concepto implica el desarrollo de prácticas específicas de uso y manejo de la tierra. Es necesario definir algunas prioridades para las tierras degradadas con medidas adaptadas para las tierras cultivadas, las pasturas y la agrosilvicultura. La clave de todo ello será el desarrollo de la agricultura de conservación.

Probablemente sea más fácil desarrollar la agricultura de conservación para los cultivos en los países en desarrollo a causa de la importancia de la degradación de la tierra. Este es el caso de Brasil y Argentina donde el desarrollo de nuevas prácticas, especialmente la labranza cero y la siembra directa es muy rápida. En Asia, la rotación arroz-trigo sin labranza está comenzando a expandirse y esa práctica podría generalizarse rápidamente. El mejoramiento de las pasturas degradadas y la expansión de la agrosilvicultura necesitarán, sin embargo, más tiempo y esfuerzos. Europa parece ser más difícil de convencer si bien las consecuencias de la agricultura de conservación sobre la calidad del agua son ahora evidentes.

La evidencia de los países de bajos ingresos en particular, es que las comunidades de agricultores enfrentan numerosos obstáculos para adoptar prácticas mejoradas si bien conocen los beneficios potenciales que ofrecen. Hay también conocimiento de las deficiencias de los datos asociados con prácticamente todas las extrapolaciones regionales y globales justificando los análisis cuantitativos y los problemas para medir e interpretar los datos de campo sobre el flujo del carbono. También faltan datos sobre diferentes ecosistemas o agrosistemas y se han encontrado críticas sobre los análisis de captura de carbono que señalan excesivos beneficios al no contabilizar el flujo total de carbono asociado con la producción de fertilizantes, el riego y la aplicación de abonos orgánicos.

Un primer paso positivo para solucionar estos problemas será la preparación de un *Manual para Mediciones y Supervisión*. Este Manual debería hacer referencia al trabajo ya hecho en el *Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático* y debería ser preparado por un pequeño grupo de expertos y después circulado entre los interesados en el tema para su revisión.

Es imperativo que en esta etapa se desarrollen algunos proyectos piloto por medio del *Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM)*, el *Mecanismo Global (GM)* y el *Banco Mundial* para probar diferentes enfoques y fortalecer la captura de carbono en las tierras áridas por medio de la adopción de técnicas que puedan promover la fertilidad y la productividad del suelo. Tales proyectos deberían proporcionar mecanismos para generar datos más seguros sobre las existencias de carbono y sus flujos bajo diferentes sistemas de producción; al mismo tiempo esos proyectos pueden preparar propuestas para intervenciones en gran escala que permitan certificar las reducciones de emisiones a ser negociadas con los países industrializados cuando

se complete la ratificación del Protocolo de Kyoto o de posibles acuerdos post-Kyoto. Un proyecto demostrativo piloto podrá ayudar a preparar protocolos para las mediciones y la supervisión del carbono del suelo, ilustrar los beneficios económicos de tales esfuerzos a los usuarios de la tierra y los beneficios de la captura de carbono a los potenciales donantes.

Es necesario que quienes toman las decisiones estén mejor informados de las oportunidades que existen en la agricultura en las zonas áridas para disminuir las emisiones de carbono e incrementar su captura y almacenamiento en los suelos y en la vegetación. Por lo tanto, una actividad importante que debe ser incluida en las actividades piloto propuestas debería ser dirigida a difundir, a todos los niveles, la información y los conocimientos existentes acerca de los beneficios potenciales de la captura de carbono en ámbitos locales, nacionales, regionales y globales.

En la nueva estrategia, la FAO tendrá varias funciones importantes: en primer lugar para validar y promover los conceptos; en segundo lugar para ayudar a medir, supervisar, modelar y después para organizar redes para asistir a los pequeños agricultores a desarrollar y adaptar soluciones prácticas. Los Estados Unidos de América están otorgando considerables recursos a este tema. Los puntos de referencia en los lugares tropicales donde existen cronosecuencias de manejo de la tierra pueden ser de interés para mejorar las metodologías y los modelos para la dinámica del carbono y para medir todos los efectos.

Mientras que la mayoría de los proyectos sobre uso de la tierra hasta ahora se han dirigido al sector forestal, los proyectos sobre el carbono del suelo en regiones semiáridas y subhúmedas podrían ofrecer excelentes oportunidades. La tierra tiene un costo relativamente bajo en los bosques tropicales húmedos donde en muchos casos la mitigación del clima puede no ser capaz de competir con la explotación forestal o demanda de tierras agrícolas. Grandes áreas de tierras degradadas y desertificadas requieren asistencia técnica y capitales para restaurar las tierras agrícolas, las pasturas y las sabanas. Si bien es difícil obtener estimaciones exactas de la desertificación, los datos actuales varían entre 3,47 y 3,97 mil millones de hectáreas de tierras desertificadas (Lal *et al.*, 1998a).

Por lo tanto, mientras que las toneladas de carbono capturadas por hectárea son relativamente pequeñas en relación con la superficie de los bosques, el potencial general para una mitigación climática económicamente efectiva es importante. Las regiones áridas de los trópicos tienen tasas muy bajas de emisión de energía por lo que no hay grandes oportunidades de reducción en ese sector; tampoco tienen grandes áreas de bosques tropicales húmedos por lo que no reúnen los requisitos para proyectos basados en el sector forestal. Los proyectos sobre carbono del suelo ofrecen una oportunidad para que las regiones semiáridas y subhúmedas puedan participar con pleno derecho en la mitigación climática y a la vez mejorar el bienestar humano.

Para que los proyectos y las actividades de captura de carbono en el suelo sean exitosos deberán tener un fuerte componente de desarrollo sostenible de modo que sus resultados mejoren las condiciones de vida de los agricultores aumentando la productividad agrícola, reduciendo el riesgo de fracaso de los cultivos y proporcionando el acceso a mejores insumos agrícolas. Los esfuerzos para la captura de carbono del suelo probablemente sean exitosos si se desarrollan sobre instituciones, iniciativas y organizaciones existentes.

Pueden existir oportunidades para establecer proyectos en cooperación con instituciones de los países industrializados para iniciar actividades de captura de carbono con comunidades locales y con las redes globales de captura de carbono. La formación de personal y la capacitación de los agricultores representarán un componente importante dentro del contexto de su apoyo a la implementación de esos proyectos. El FMAM también tiene el potencial para cooperar en

tales actividades dentro del marco de la implementación del UN-FCCC. La interacción entre las tres Convenciones -UN-CCD, UN-FCCC y UN-CDB- respecto al desarrollo de las zonas áridas debería constituir el principal objetivo de los Programas de Desarrollo de las Tierras Áridas y Semiáridas.

Es necesario iniciar estudios para evaluar el impacto potencial de algunos de los proyectos en ejecución tales como zonas verdes, programas de forestación y programas de rehabilitación de zonas de pastoreo para evaluar su contribución potencial a la captura de carbono. Más aún, las actividades planificadas para producir abonos orgánicos y convertir los residuos de las plantas -especialmente la paja del arroz- en materia orgánica en lugar de quemarla, deben ser cuidadosamente evaluadas con respecto al carbono. El desarrollo de fuentes de energía alternativa y renovable tales como el biogás, la energía eólica y la energía solar también deberían ser consideradas.

Los grandes cambios que están ocurriendo en la agricultura son una verdadera Revolución Verde, de más amplia aplicación y sostenibilidad que la anterior.

Referencias

- Alexandratos, N.** (ed). 1995. World Agriculture towards 2010. FAO and John Wiley and Sons. 488 pp.
- Andreu, F., Choné, T.** 1993. Dynamics of soil organic matter in the Amazon ecosystem and after deforestation: basis for efficient agricultural management. 51 pp. Centre National de la Recherche Scientifique, Nancy.
- Angers, D.A., Carter, M.R., Gregorich, E.G., Bolinder, M.A., Donald, R.G., Voroney, R.P., Drury, C.F., Liang, B.C., Simard, R.R., Beyaert, R.P.** 1995. Agriculture management effects on soil carbon sequestration in Eastern Canada. pp. 253-264. In Beran, M.A. ed. *Carbon Sequestration in the Biosphere, NATO ASI Series. Vol 1 33* Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg.
- Angers, D.A., Chenu, C.** 1998. Dynamics of soil aggregation and C sequestration. In: Soil processes and the carbon cycle. Lal, R., J.M. Kimble, R.A. Follett, and B.A. Stewart eds. CRC Press, Boca Raton, FL. Chapter 14, pp.199-206
- Arrouays, D., Péliissier, P.** 1994. Changes in carbon storage in temperate humic loamy soils after forest clearing and continuous corn cropping in France. *Plant Soil* 160. 215-223.
- Arrouays, D., Deslais, W., Daroussin, J., Balesdent, J., Gaillard, J., Dupoucy, J.L., Nys, C., Badaeu V., Belkacem, S.** 1999 Stocks de carbone dans les sols de France: quelles estimations? C.R. *Acad Agric. Fr* 85. 278-292.
- Baldy, C.** 2000. Conservation du milieu naturel tropical avec des plantes de couverture et des arbres d'ombrage. *Cahiers Agricultures* 9 (4) : 267-278.
- Balesdent, J.** 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols de France. *Etude et Gestion des sols* 3 (4) : 245-260.
- Balesdent, J., Arrouays, D.** 1999. Usage des terres et stockage du carbone dans les sols du territoire français (1900-1999) C.R. *Acad. Agric. Fr* 85 (6): 265-277.
- Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M.** 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* 53: 215-220.
- Balesdent, J., Arrouays, D., Gaillard J.** 2000. MORGANE : un modèle de simulation des réserves organiques des sols et de la dynamique du carbone des sols. *Submitted to Agronomie*.
- Batjes, N.H.** 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47: 151-163.
- Batjes, N.H.** 1999. Management options for reducing CO₂ concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. ISRIC. Wageningen, The Netherlands. 114 pp.
- Bazzaz, F., Sombroek, W.G.** (eds) 1996. Global Climate Change and Agricultural Production. FAO and Wiley, Chichester. Benites, J., Dudal, R., Koohafkan, P. 1999. Land, the platform for local food security and global environmental protection. In *World Soil Resources Report 86*. FAO, Rome. p.37-42
- Bilan et gestion des gaz à effet de serre dans l'espace rural.** 1999. Comptes Rendus Académie Agriculture de France Vol 85 n. 6, 392 pp.
- Brinkman, R., Sombroek, W.G.** 1996. The effects of global change on soil conditions in relation to plant growth and food production. In F. and W.G. Sombroek eds. *Global Climate Change and Agricultural Production*. Bazzaz FAO and Wiley, Chichester, UK. p 49-63.

- Buyanovski, G.A., Wagner, G.H.** 1998. Changing role of cultivated land in the global carbon cycle. *Biology and Fertility of Soils* 27: 242-245.
- Cairns, M.A., Meganck, R.A.** 1994. Carbon sequestration, biological diversity and sustainable development: integrated forest management. *Environmental Management* 18 (1): 13-22.
- Cambardella, C.** 1998. Experimental verification of simulated soil organic matter pools. In Lal L., Kimble J.M., Follett R.A., Stewart B.A. eds. *Soil processes and the carbon cycle*. CRC Press, Boca Raton FL. p 519-526
- Cerri, C., Feller, C., Balesdent, J., Victoria, R., Plenecassagne, A.** 1985. Application du traçage isotopique naturel ^{13}C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *C.R. Acad. Sc. Paris*, Ser 2, 300: 423-428.
- Chauvel A., Grimaldi, M., Tessier, D.** 1991. Changes in soil-pore-space distribution following deforestation and revegetation: An example from the Central Amazon Basin, Brazil. *Forestry Ecology and Management* 38: 259-271.
- Choné, T., Andreux, F., Correa, J.C., Volkoff, B., Cerri, C.C.** 1991. Changes in organic matter in an Oxisol from the Central Amazonian forest during eight years as pasture determined by ^{13}C isotopic composition. In Berthelin, J. ed. *Diversity of environmental biogeochemistry*. Elsevier, Amsterdam. p. 397-405.
- CIRAD.** 1996 Agriculture au Brésil. Agriculture et Développement, 12 décembre 1996, Cirad, France. 76 pp.
- CIRAD.** 1998 Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture. *Actes de l'Atelier International* 23-28 mars 1998. Antsinabe, Madagascar, ed F. Rasolo M. Raunet 658 pp.
- CIRAD.** 1999 Ecosystèmes cultivés : l'approche agro-écologique. Agriculture et Développement, 21 mars 1999, Cirad, France. 109 pp.
- Coleman, K. & Jenkinson, D.S.** 1995. RothC-26 3. A model for the turnover of carbon in soil: model description and users guide. ISBN 0951 4456 69.
- Coleman, K. & Jenkinson, D.S.** 1995. RothC-26 3. A model for the turnover of carbon in soil. In D.S. Powlson, P. Smith & J.U. Smith eds. *Evaluation of soil organic matter models using existing long-term datasets*. NATO ASI Series I, Volume 38, Springer-Verlag, Heidelberg: p 237-246.
- Copley, J.** 2000. Ecology goes underground. *Nature* 406: 402-454.
- Dao, T.H.** 1998. Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a Paleustoll. *Agronomy Journal* 88: 141-148.
- Davidson, E.A., Ackerman, I.L.** 1993. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry* 20: 161-193.
- De Moraes, J.F.L., Volkoff, B., Cerri, C.C., Bernoux, M.** 1996. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondonia, Brazil. *Geoderma* 70: 63-81.
- Diaz, S., J.P. Grime, J.P., Harris, J., McPherson, E.** 1993. Evidence of a feedback mechanism limiting plant response to elevated carbon dioxide. *Nature* 364: 616-617.
- Dick, W.A., Blevins, R.L. Frye, W.W. Peters, S.E. Christenson, D.R., Pierce, F.J., Vitosh, M.L.** 1998. Impacts of agricultural management practices on C sequestration in forest-derived soils of the eastern Corn Belt. *Soil & Tillage Research* 47: 235-244.
- Dixon, R.K.** 1995. Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gas? *Agroforestry systems* 31: 99-116.
- Dregne, H.E.** (ed) 1992. Degradation and restoration of Arid Lands. Texas Tech. Univ. Lubbock.
- Drinkwater, L.E., Wagoner, P. & Sarrantonio, M.** 1998. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature* 396: 262-265.

- Dupouey, J.L., Siguand, G., Bateau, V., Thimonier, A., Dhole, J.F., Nepveu, G., Bergé, L. Augusto, L., Belkacem, S., Nys, C.** 1999. Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. *C.R. Acad. Agric. Fr* 85 (6): 293-310
- El Titi A. and Landes H.** 1990. Integrated farming system of Lautenbach: a practical contribution toward sustainable agriculture in Europe. In Edwards, C. et al. eds. *Sustainable Agricultural Systems*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.
- Eyre N., Downing T., Hoekstra R., Rennings K., and Tol R S J.** 1997. *Global Warming Damages*. ExternE Global warming Sub-Task, Final Report, European Commission JOS3-CT95-0002, Brussels.
- Eswaran, H., Van Den Berg, E., Reich, P.** 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci Soc Am J* 57: 192-194
- FAO.** 1993. Forest Resources Assessment 1990, Tropical Countries. *FAO Forestry Paper* 112. Rome.
- FAO.** 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. *World Soil Resources Reports* 88. Rome. 98 pp.
- FAO/IFAD.** 1999. Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean. *World Soil Resources Reports* 86.
- FAO/IIASA.** 1999. World Agro-Ecological Zoning. FAO, Rome.
- FAO.** 2000. Manual on integrated soil management and conservation practices. *Land and water bulletin* 8, FAO, Rome. 204 pp.
- FAO/GTZ.** 2001. Meeting on verification of country-level carbon stocks and exchanges in non-annex I countries. FAO, Rome.
- Fassbender, H.W., Beer, J. Henveldop, J., Imbach, A., Enriquez, G. el Bonnemann, A.** 1991. Ten year balance of organic matter and nutrients in agroforestry systems at CATIE Costa Rica *Forest Ecology and Management* 45: 173-183.
- Feller, C.** 1979. Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols : application aux sols tropicaux à texture grossière, très pauvres en humus. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie* 17 : 339-346.
- FiBL.** 2000. Organic Farming Enhances Soil Fertility and Biodiversity. Results from a 21 year field trial. FiBL Dossier 1 (August). Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Zurich.
- Field, C.B., Fung, I.V.** 1999. The not-so-big U.S. carbon sink. *Science* 285: 544-545.
- Fisher, M.J., Rao, I.M., Ayarza, M.A., Lascano, C.E., Sanz, J.I., Thomas, R.J., Vera, R.R.** 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 371: 236-237.
- Fisher, M.J., Rao, I.M., Ayarza, M.A., Lascano, C.E., Sanz, J.I., Thomas, R.J. & Vera, R.R.** 1995. Pasture soils as carbon sink. *Nature* 376: 472-473.
- Frankhausen, S.** 1994. *Valuing Climate Change*. Earthscan, London.
- Garcia Torres, L., Gonzalez Fernandez** (eds). 1997. Agricultura de Conservación: Fundamentos agronómicos, medioambientales y economicas. Asociación Española Laboreo de conservación/suelos vivos, Córdoba, Spain 372 pp.
- Gaston, C.G., Kolchugina, T., Vinson, T.S.** 1993. Potential effect of no-till management on carbon in the agricultural soils of the former Soviet Union. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 45: 295-309.
- Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J.O., Clarke, P.** 1994. Soil structure and carbon cycling. *Aust. J. Sci. Res.* 32: 1043-68.

- Greenland, D.J.** 1994. Long term cropping experiments in developing countries: The need, the history and the future. In Leigh, R.A., Johnston, A.E. eds. *Long-term experiments in Agricultural and Ecological Sciences*. p 187-209. CAB International, Wallingford 428pp.
- Greenland, D.J.** 1995. Land use and soil carbon in different agroecological zones. In: *Soils and global Change*. Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds). CRC & Lewis Publishers, Boca Raton, FL. p 1-24
- Greenland, D.J., Gregory, P.J., Nye, P.H.** (eds). 1998. Land resources: on the edge of the Malthusian precipice. CAB. International and Royal Society, London. 173 pp.
- Gregorich, E.G., Greer, K.J., Anderson, D.W., Liang, B.C.** 1998. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects. *Soil & Tillage Research* 47: 291-302.
- Gregorich, E.G., Drury, C.F., Ellert, B.H., Liang, B.C.** 1996. Fertilization effects on physically protected light fraction organic matter. *Soil Sci Soc Am J* 60:472-476.
- Gregory, P.J., Simmonds, L.P., Warren, G.P.** 1998. Interactions between plant nutrients, water and carbon dioxide as factors limiting crop yields. *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series B*, 352: 987-996.
- Gregory, P.J., Simmonds, L.P., Lal, R.** 1990. Soil erosion and land degradation: the global risks. *Adv. In: Soil Sci.* 11: 129-172.
- Heal, O.W., Anderson, J.M., Swift, M.J.** 1997. Plant litter quality and decomposition: an historical overview. In: *Driven by nature: plant litter quality and decomposition*. Cadisch, G., Giller, K.E. (eds). CAB International, Wallingford, UK. pp 3-30.
- Hendricks, P., Parmelee R., Cressley, D., Coleman, D., Odum, E., Groffman, P.** 1986. Detritus food webs in conventional and no-tillage. *Agrosystems Biosciences* 36 (6):374-380.
- Holland M., Forster D., Young K., Haworth A. and Watkiss P.** 1999. Economic Evaluation of Proposals for Emission Ceilings for Atmospheric Pollutants. *Interim report for DG XI of the European Commission*. AEA Technology, Culham, Oxon.
- Houghton, R.A.** 1995. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850, In: (eds). *Soils and Global Change*. Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. CRC & Lewis Publishers, Boca Raton, FL. p. 45-65.
- Houghton, R.A., Hackler, J.L., Lawrence, K.T.** 1999. The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. *Science* 285: 574-577.
- Houghton, R.A., Skole, D.L., Lefkowitz, D.S.** 1991. Changes in the landscape of Latin America between 1850 and 1985. *Forest Ecology and Management*. 38: 173-199.
- Howard, P.J.A., Loveland, P.J., Bradley, R.I., Dry, F.T., Howard, D.M., Howard, DC.** 1995. The carbon content of soil and its geographical distribution in Great Britain. *Soil Use and Management*. 11: 9-15.
- Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^e siècle** 2000. Ministère de de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Paris. 128pp.
- International Geosphere biosphere program** 1998. The terrestrial cycle: implications for the Kyoto protocol. *Science* 280:1393-1394.
- IPCC.** 2000. Land use, land-use change, and forestry special report. *Cambridge University Press* 377 pp.
- Izac, A.M.N.** 1997. Developing policies for soil carbon management in tropical regions. *Geoderma* (special issue) 79 (1-40): 261-276.
- Jenkinson, D.S., Rayner, J.H.** 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci* 123: 298-305.

- Johnston, A.E.** 1973. The effects of ley and arable cropping systems on the amounts of soil organic matter in the Rothamsted and Woburn Ley arable experiments. *Rothamsted Experimental Station Annual Report for 1972 Part 2*, 131-159.
- Kaetterer T., and Andrén O.** 1999. Long-term agricultural field experiments in N Europe: analysis of the influence of management on soil stocks using the ICBM model. *Agric. Ecosys. and Environ.* 72, 165-179.
- Kolchugina, T.P., Vinson, T.S., Gaston, G.G., Rozkov, V.A. , Shwidendo, A.Z.** 1995. Carbon pools, fluxes, and sequestration potential in soils of the Former Soviet Union. *In* Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. eds *Soil Management and the Greenhouse Effect*. CRC & Lewis Publishers, Boca Raton, FL. pp. 25-40
- Lal, R.** 1990. Soil erosion and land degradation: the global risks. *Adv. In Soil Sci.* 11:129-172.
- Lal, R., Kimble, J.M.** 1994. Soil management and the greenhouse effect. *In* Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. eds. *Soil Processes and the Greenhouse Effect*. USDA-SCS, Lincoln, NE. p. 1-5.
- Lal, R.** 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂ enrichment. *Soil & Tillage Research* 43: 81-107.
- Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F., Cole, C.V.** 1998a). The Potential of U.S. Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect. *Ann Arbor Press*, Chelsea, MI. 128pp.
- Lal, R., Kimble J.M., Follett R.F., Stewart B.A.** (eds). 1998b). Soil processes and the carbon cycle. *Adv in Soil Science*, CRC Press 609 pp.
- Lal, R., Kimble J.M., Follett R.F.** (eds) 1998c) Management of carbon sequestration in soil. *CRC Press* 480 pp.
- 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 land management with a focus on Latin America and the Caribbean. *World Soil Resources Report* 86. FAO, Rome. p 45-52.
- Lal, L., Kimble, J.M., Stewart, B.A.** (eds) 2000. Global climate change and tropical ecosystems. CRC press & Lewis publishers, Boca Raton, FL.
- Lal, R.** 2000. Soil quality and soil erosion. CRC press 352 pp.
- Lal, R., Kimble, I., Levine, E, Stewart, B.A.** (eds) 1995. Soils and global change. CRC & Lewis publishers, Boca Raton FL
- Lavelle, P.** 2000. Ecological challenges for soil science. *Soil science* 165 (1):73-86.
- Loby de Bruyn, L.A.** 1997. The status of soil macrofauna as indicators of soil health to monitor the sustainability of Australian agricultural soils. *Ecological economics* 23: 167-178.
- Lockeretz, W., Shearer, G. and Kohl, D.H.** 1981. Organic farming in the Corn Belt. *Science* 211, p 540-547.
- Lyon, D.J.** 1998. Long-term tillage comparisons for winter wheat-fallow in the US Central Great plains. *Soils & Tillage Research* 49: 1.
- Management of carbon in tropical soils under global change: science, practices and policy.** 1997. *Geoderma* (Special Issue) 79 (1-4), 279 pp.
- Middleton, N., Thomas, D.** 1997. World atlas of desertification (second edition). UNEP. 182 pp.
- Monnier, G., Thevenet, G., Lesaffre, B.** 1994. Simplification du travail du sol. *Colloques INRA* n  65, 172 pp.
- Moraes, J.L., Cerri, C.C., Melillo, J.M.** 1995. Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon basin. *Soil Sci Soc Am J* 59: 244-247.

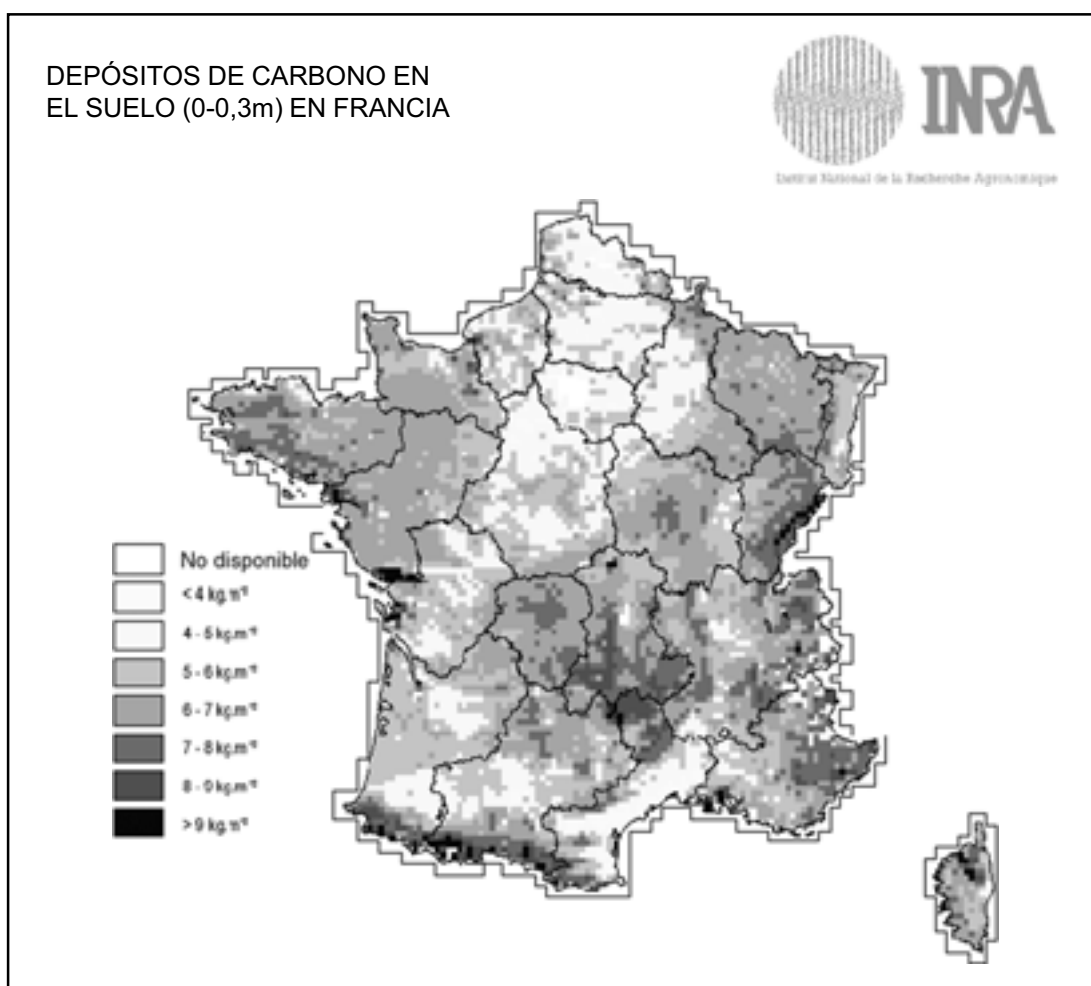
- Moraes, J.L., Seyler, F., Cerri, C.C. & Volkoff, B.** 1998. Land cover mapping and carbon pools estimates in Rondonia, Brazil. *Int J. Remote Sensing* 19: 921-934.
- Neill, C. Cerri, C.C., Melillo, J.M., Feigl, B.J., Stendler, P.A., Moraes, J.F.L., Piccolo, M.C.** 1998. Stocks and dynamics of soil carbon following deforestation for pasture in Rondônia. In Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. eds. *Soil processes and the carbon cycle. Adv. In Soil Science* 1. CRC Press. p 9-28.
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A., Sombroek, W.G.** 1991. (2^d ed.) World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note. United Nation Environment Programme, Nairobi.
- Oldeman, L.R.** 1994. The global extent of soil degradation. pp 99-117 in: Greenland, D.J. and Szabolcs, I. (eds). *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. CAB International, Wallingford, UK.
- Pankhurst, C.E., Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R., Grace, P.R.** (eds). 1994. *Soil Biota Management in Sustainable Farming Systems*. SCIRO, Australia 262 pp.
- Parton, W.J., Stewart, W.B. and Cole, C.V.** 1988. Dynamics of C,N,P, and S in grassland soils: A model. *Biogeochemistry* 5:109-131.
- Parton, W.J., Woome, P.L. and Martin, A.** 1994. Modelling soil organic matter dynamics and plant productivity in tropical ecosystems. pp. 171-188 In: P.Woome and M. Swift (eds.). *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. TSBF/John Wiley & Sons.
- Paustian, K., Elliot, E.T., Carter, M.R.** 1998a) Tillage and crop management impacts on soil C storage: use of long-term experimental data. *Soil & Tillage Research* 47: vii-xii.
- Paustian, K., Elliot, E.T., Killian K.** 1998b). Modeling soil carbon in relation to management and climate change in some agroecosystems in Central North America. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds). CRC Press. Boca Raton, FL. p 459-471.
- Paustian, K., Levine, E. Post, W.M., Ryzhova, I.M.** 1997. The use of models to integrate information and understanding of soil C at the regional scale. *Geoderma* 79: 227-260.
- Pearce D W., Cline W R., Achanta A N., Fankhauser S., Pachauri R K., Tol R S J., and Vellinga P.** 1996.. The social costs of climate change: greenhouse damage and benefits of controls. In: *Climate Change (1995): Economic and Social Dimensions of Climate Change*. Bruce et al (eds). Cambridge University Press, Cambridge.
- Petersen C., Drinkwater L A. and Wagoner P.** 2000.. *The Rodale Institute's Farming Systems Trial. The First 15 Years*. Rodale Institute, Penn.
- Phillips, O.I., Malhi, V., Higuchi, N., Laurance, W.F., Nunez, P.V., Vasquez, R.M., Laurence, S.G., Ferreira, L.V., Stern, M., Brown, S., Grace, J.** 1998. Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots. *Science* 282: 439-442.
- Pieri, C.** 1989. Fertilité des terres de savanes. Ministère de la Coopération. CIRAD. 444 p.
- Ponce-Hernandez, R.** 1999. Assessing the carbon stock and carbon sequestration potential of current and potential land use systems and the economic rationality of land use conversions. In: Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean. *World Soil Resources Report* 86. FAO, Rome. p 77-92.
- Poss, R.** 1991. Transferts de l'eau et des éléments chimiques dans les terres de barre du Togo. Thèse Univ. Paris VI. Editions ORSTOM. 355 pp.
- Post, W.H., Kwon, K.C.** 2000 Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential. *Global change Biology* 6: 327-327.
- Post, W.M., Emmanuel, W.R., Zinke, P.J., Stangenberger, A.F.** 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 258: 165-159.

- Potter, P.K., Jones, O.R., Torbett, H.A., Unger, P.W.** 1997. Crop rotation and tillage effects on organic carbon sequestration in the semiarid southern Great plains. *Soil Science* 162 (2): 140-147.
- Powelson, D.S., Smith, P., Coleman, K., Smith, J.U., Glendinning, M.J., Korschens, M. & Franko, U.** 1998. A European network of long-term sites for studies on soil organic matter. *Soil & Tillage Research* 47: 263-274.
- Pretty J. and Ball A.** 2001. Agricultural Influences on Carbon Emissions and Sequestration: A Review of Evidence and the Emerging Trade Options. Centre for Environment and Society. *Occasional Paper 2001-03*. University of Essex [in pdf at URL www2.essex.ac.uk/ces].
- Puget, P., Chenu, C., Balesdent, J.** 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *European Journal of Soil Science* 46: 449-459.
- Reganold J P., Elliott L F., and Unger Y L.** 1987.. Long-term effects of organic and conventional farming on soil erosion. *Nature* 330,370-372.
- Reicosky, D.C., Lindstrom, M.J.** 1995. Impact of fall tillage on short-term carbon dioxide flux. In Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. eds. *Soils and global change*. CRC Press.
- Robert, M.** 1996a). Aluminum toxicity a major stress for microbes in the environment. In Huang, P.M. et al., eds. *Environmental Impacts*. Vol. 2, Soil component interactions. CRC press. p 227-242.
- Robert, M.** 1996b). Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Dunod/Masson, Paris 240 pp.
- Robert, M., Chenu, C.** 1991. Interactions between soil minerals and microorganisms. In Bollag, J.M., Stotzky, G. eds. *Soil Biochemistry* 7. Marcel Dekker, New York. p 307-393.
- Robert, M., Stengel, P.** 1999. Sols et agriculture: ressource en sol, qualité et processus de dégradation. *Cahiers Agricultures* 8 (4): 301-308.
- Rosenzweig, C., Hillel, D.** 2000. Soils and global climate change: challenges and opportunities. *Soil Science* 165 (1): 45-56.
- Rovira, A.D.** 1994. The effect of farming practices on the soil biota. In Soil Biota Management in Sustainable Farming Systems, Vol.1. In Pankhurst, C.E., Doube, B.M. Gupta, V.VSR, Grace P.R. eds. SCIRO, Australia.
- Sala O E. and Paruelo J M.** 1997. Ecosystem services in grasslands. In Daily G (ed). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington DC.
- Sanchez, P.A., Salinas, I.G.** 1982. Low-input technology for managing oxisols and ultisols in tropical America. *Adv. Agron.* 34: 279-406.
- Sanchez, P.A.** 1995. Science in agroforestry. *Agroforestry Systems* 30: 5-55.
- Sanchez, P.A., Buresh, R.J., Leakey R.R.B.** 1999. Trees, soils and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B* 353: 949-961.
- Sarrailh, J.M.** 1990. Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais (opération Ecerex). INRA Centre Technique Forestier Tropical. 273 pp.
- Schindler, D.W.** 1999. The mysterious missing sink. *Nature* 398: 105-107.
- Schroeder, P.** 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 27: 89-97.
- Skjemstad, J.O., Clarke, P., Taylor, J.A., Oades, J.M., McClure S.G.** 1996. The chemistry and nature of protected carbon in soil. *Australian Journal of Soil Research* 34: 251-271.
- Smith, P., Powelson, D S., Glendinning, A J., and Smith, J. U.** 1998. Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Global Change Biology* 4, 679-685.
- Smith, K.A.** 1999. After the Kyoto Protocol: can soil scientists make a useful contribution. *Soil use and Management* 15: 71-75.

- Smith, P., Fallon, P., Coleman, K., Smith, J., Piccolo, M.C., Cerri, C., Bernoux, M., Jenkinson, D., Ingram, J., Szabo, J., Pasztor, L.** 1999. Modeling soil carbon dynamics in tropical ecosystems. *In* Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. eds. Global climate change and tropical ecosystems. *Adv. In Soil Science*. CRC Press. p 341-364
- Smith, P., Powlson, D.S., Smith, J.U. & Elliot, E.T.e.** 1997. Evaluation and comparison of soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* 81 (Special Issue), 225.
- Sombroek, W.G., Nachtergaele, F.O. & Hebel, A.** 1993. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio* 22: 417-426.
- Stewart, B.A.** 1995. Soil management in semiarid regions. *In* Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. eds. *Soils and global change*. CRC/Lewis publishers, Boca Raton, FL. p 251-258.
- Swift M.J., seward P.D., Frost P.G.H., Ouresbi J.N., Muchena F. N** 1994. Long term experiments in Africa: Developing a database for sustainable land use under Glabal Change. *In* Leigh, R.A., Johnston, A.E. eds Long-term experiments in Agricultural and Ecological Sciences.. p 229-251. CAB International, Wallingford, UK. 428pp.
- Tavarez-Filho, J., Tessier, D.,** 1998. Influence des pratiques culturales sur le comportement et les propriétés de sols du Parana (Brésil). *Etudes et Gestion des sols* 5(1):61-71.
- Tebruegge, F., Guring, R-A.** 1999. Reducing tillage intensity – a review of results from a long-term study in Germany. *Soil and tillage research* 53:15-28.
- Tebruegge, F.** 2000. No-tillage visions – protection of soil, water and climate. Institute for Agricultural Engineering, Justus-Liebig University, Giessen, Germany.
- Tian, H., Mellilo, J.M., Kicklighter, D.W., McGuire, A.D., Helfrich III, J.V.K., Moore III, B., Vörösmarty, C.J.** 1998. Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. *Nature* 396: 664-667.
- Tilman D.** 1998.. the greening of the green revolution. *Nature* 396, 211-212.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M.** 1982. Organic matter and water stable aggregates. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Trumbmore, S.E., Davidson, E.A., Barbosa de Camargo, P., Nepstad, D.D., Martinelli, L.A.** 1995. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles* 9: 515-528.
- Van Noordwijk, M., Cerri, C., Woomer, P.L., Nugroho, K., Bernoux, M.** 1997. Soil carbon dynamics in the humid tropical forest zone. *Geoderma* 79: 187-225.
- Wander, M., Bidart, M., and Aref, S.** 1998. Tillage experiments on depth distribution of total and particulate organic matter in 3 Illinois soils. *Soil Sci.Soc.Am.* 62. 1704-11.
- Winterbottom, R., Hazlwood, P.T.** 1987. Agroforestry and sustainable development: making the connection. *Ambio* 16 (2-3): 100-110.
- Woomer, P.L., Palm, C.A., Qureshi, J.N., Kotto-Same, J.** 1998. Carbon sequestration and organic resource management in African smallholder agriculture. *In*: Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. eds. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, FL. p. 153-173.
- Young, A.** 1991. Soil monitoring: a new basic task for soil surveys, *Soil Use and Management* 7: 126-130.
- Young, A.** 1997. Agroforestry for soil management, pp. 257-8.

Anexo 1

Mapa del carbono total en los suelos



Fuente: *Soil Use & Management*. Arrouays et al., 2000 (en prensa).

Anexo 2

Artículos 3.3 y 3.4 del Protocolo de Kyoto

ARTÍCULO 3.3

Los cambios netos en las emisiones de gas de invernadero por las fuentes y la absorción por los sumideros que se deban a la actividad humana directamente relacionada con el cambio del uso de la tierra y la silvicultura, limitada a la forestación, reforestación y deforestación desde 1990, calculadas como variaciones verificables del carbono almacenado en cada período de compromiso, serán utilizadas a los efectos de cumplir los compromisos de cada Parte incluida en el Anexo 1 dimanantes del presente artículo. Se informará de las emisiones por las fuentes y la absorción por los sumideros de gases de efecto invernadero que guarden relación con esas actividades de una manera transparente y verificable y se les examinará de conformidad con lo dispuesto en los artículos 7 y 8.

ARTÍCULO 3.4

Antes del primer período de sesiones de la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo, cada una de las Partes incluidas en el Anexo 1 presentará al Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico y Tecnológico, para su examen, datos que permitan establecer el nivel del carbono almacenado correspondiente a 1990 y hacer una estimación de las variaciones de ese nivel en los años siguientes. En su primer período de sesiones o lo antes posible después de este, la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo, determinará las modalidades, normas y directrices sobre la forma de sumar o restar a las cantidades atribuidas a las Partes del Anexo 1 actividades humanas adicionales relacionadas con las variaciones de las emisiones por las fuentes y la absorción por los sumideros de gases de efecto invernadero en las categorías de suelos agrícolas y de cambio del uso de la tierra y silvicultura y sobre las actividades que se hayan de sumar o restar, teniendo en cuenta las incertidumbres, la transparencia de la presentación de informes, la verificabilidad, la labor metodológica del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, el asesoramiento prestado por el Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico y Tecnológico de conformidad con el Artículo 5 y las decisiones de la Conferencia de las Partes. Tal decisión se aplicará en los períodos segundo y siguientes. Una Parte podrá optar por aplicar tal decisión sobre estas actividades humanas adicionales para su primer período de compromiso, siempre que estas actividades se hayan realizado desde desde 1990.

INFORMES SOBRE RECURSOS MUNDIALES DE SUELOS

1. Report of the First Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Rome, 19-23 June 1961 (I)**
2. Report of the First Meeting on Soil Survey, Correlation and Interpretation for Latin America, Rio de Janeiro, Brazil, 28-31 May 1962 (I)**
3. Report of the First Soil Correlation Seminar for Europe, Moscow, USSR, 16-28 July 1962 (I)**
4. Report of the First Soil Correlation Seminar for South and Central Asia, Tashkent, Uzbekistan, USSR, 14 September-2 October 1962 (I)**
5. Report of the Fourth Session of the Working Party on Soil Classification and Survey (Subcommission on Land and Water Use of the European Commission on Agriculture), Lisbon, Portugal, 6-10 March 1963 (I)**
6. Report of the Second Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Rome, 9-11 July 1963 (I)**
7. Report of the Second Soil Correlation Seminar for Europe, Bucharest, Romania, 29 July-6 August 1963 (I)**
8. Report of the Third Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Paris, 3 January 1964 (I)**
9. Adequacy of Soil Studies in Paraguay, Bolivia and Peru, November-December 1963.**
10. Report on the Soils of Bolivia, January 1964 (I)**
11. Report on the Soils of Paraguay, January 1964 (I)**
12. Preliminary Definition, Legend and Correlation Table for the Soil Map of the World, Rome, August 1964 (I)**
13. Report of the Fourth Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Rome, 16-21 May 1964 (I)**
14. Report of the Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash, Tokyo, Japan, 11-27 June 1964 (I)**
15. Report of the First Session of the Working Party on Soil Classification, Survey and Soil Resources of the European Commission on Agriculture, Florence, Italy, 1-3 October 1964 (I)**
16. Detailed Legend for the Third Draft on the Soil Map of South America, June 1965 (I)**
17. Report of the First Meeting on Soil Correlation for North America, Mexico, 1-8 February 1965 (I)**
18. The Soil Resources of Latin America, October 1965 (I)**
19. Report of the Third Correlation Seminar for Europe: Bulgaria, Greece, Romania, Turkey, Yugoslavia, 29 August-22 September 1965 (I)**
20. Report of the Meeting of Rapporteurs, Soil Map of Europe (Scale 1:1 000 000) (Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture), Bonn, Federal Republic of Germany, 29 November-3 December 1965 (I)**
21. Report of the Second Meeting on Soil Survey, Correlation and Interpretation for Latin America, Rio de Janeiro, Brazil, 13-16 July 1965 (I)**
22. Report of the Soil Resources Expedition in Western and Central Brazil, 24 June-9 July 1965 (I)**
23. Bibliography on Soils and Related Sciences for Latin America (1st edition), December 1965 (I)**
24. Report on the Soils of Paraguay (2nd edition), August 1964 (I)**
25. Report of the Soil Correlation Study Tour in Uruguay, Brazil and Argentina, June-August 1964 (I)**
26. Report of the Meeting on Soil Correlation and Soil Resources Appraisal in India, New Delhi, India, 5-15 April 1965 (I)**
27. Report of the Sixth Session of the Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture, Montpellier, France, 7-11 March 1967 (I)**
28. Report of the Second Meeting on Soil Correlation for North America, Winnipeg-Vancouver, Canada, 25 July-5 August 1966 (I)**
29. Report of the Fifth Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Moscow, USSR, 20-28 August 1966 (I)**
30. Report of the Meeting of the Soil Correlation Committee for South America, Buenos Aires, Argentina, 12-19 December 1966 (I)**
31. Trace Element Problems in Relation to Soil Units in Europe (Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture), Rome, 1967 (I)**
32. Approaches to Soil Classification, 1968 (I)**
33. Definitions of Soil Units for the Soil Map of the World, April 1968 (I)**
34. Soil Map of South America 1:5 000 000, Draft Explanatory Text, November 1968 (I)**
35. Report of a Soil Correlation Study Tour in Sweden and Poland, 27 September-14 October 1968 (I)**

36. Meeting of Rapporteurs, Soil Map of Europe (Scale 1:1 000 000) (Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture), Poitiers, France 21-23 June 1967 (I)**
37. Supplement to Definition of Soil Units for the Soil Map of the World, July 1969 (I)**
38. Seventh Session of the Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture, Varna, Bulgaria, 11-13 September 1969 (I)**
39. A Correlation Study of Red and Yellow Soils in Areas with a Mediterranean Climate (I)**
40. Report of the Regional Seminar of the Evaluation of Soil Resources in West Africa, Kumasi, Ghana, 14-19 December 1970 (I)**
41. Soil Survey and Soil Fertility Research in Asia and the Far East, New Delhi, 15-20 February 1971 (I)**
42. Report of the Eighth Session of the Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture, Helsinki, Finland, 5-7 July 1971 (I)**
43. Report of the Ninth Session of the Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture, Ghent, Belgium 28-31 August 1973 (I)**
44. First Meeting of the West African Sub-Committee on Soil Correlation for Soil Evaluation and Management, Accra, Ghana, 12-19 June 1972 (I)**
45. Report of the Ad Hoc Expert Consultation on Land Evaluation, Rome, Italy, 6-8 January 1975 (I)**
46. First Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Nairobi, Kenya, 11-16 March 1974 (I)**
47. Second Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Addis Ababa, Ethiopia, 25-30 October 1976 (I)
48. Report on the Agro-Ecological Zones Project, Vol. 1 - Methodology and Results for Africa, 1978. Vol. 2 - Results for Southwest Asia, 1978 (I)
49. Report of an Expert Consultation on Land Evaluation Standards for Rainfed Agriculture, Rome, Italy, 25-28 October 1977 (I)
50. Report of an Expert Consultation on Land Evaluation Criteria for Irrigation, Rome, Italy, 27 February-2 March 1979 (I)
51. Third Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Lusaka, Zambia, 18-30 April 1978 (I)
52. Land Evaluation Guidelines for Rainfed Agriculture, Report of an Expert Consultation, 12-14 December 1979 (I)
53. Fourth Meeting of the West African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Banjul, The Gambia, 20-27 October 1979 (I)
54. Fourth Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Arusha, Tanzania, 27 October-4 November 1980 (I)
55. Cinquième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Lomé, Togo, 7-12 décembre 1981 (F)
56. Fifth Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Wad Medani, Sudan, 5-10 December 1983 (I)
57. Sixième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre Africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Niamey, Niger, 6-12 février 1984 (F)
58. Sixth Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Maseru, Lesotho, 9-18 October 1985 (I)
59. Septième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Ouagadougou, Burkina Faso, 10-17 novembre 1985 (F)
60. Revised Legend, Soil Map of the World, FAO-Unesco-ISRIC, 1988. Reprinted 1990 (I)
61. Huitième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Yaoundé, Cameroun, 19-28 janvier 1987 (F)
62. Seventh Meeting of the East and Southern African Sub-Committee for Soil Correlation and Evaluation, Gaborone, Botswana, 30 March-8 April 1987 (I)
63. Neuvième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Cotonou, Bénin, 14-23 novembre 1988 (F)
64. FAO-ISRIC Soil Database (SDB), 1989 (I)
65. Eighth Meeting of the East and Southern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Harare, Zimbabwe, 9-13 October 1989 (I)
66. World soil resources. An explanatory note on the FAO World Soil Resources Map at 1:25 000 000 scale, 1991. Rev. 1, 1993 (I)
67. Digitized Soil Map of the World, Volume 1: Africa. Volume 2: North and Central America. Volume 3: Central and South America. Volume 4: Europe and West of the Urals. Volume 5: North East Asia. Volume 6: Near East and Far East. Volume 7: South East Asia and Oceania. Release 1.0, November 1991 (I)

68. Land Use Planning Applications. Proceedings of the FAO Expert Consultation 1990, Rome, 10-14 December 1990 (I)
69. Dixième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Bouaké, Odienné, Côte d'Ivoire, 5-12 novembre 1990 (F)
70. Ninth Meeting of the East and Southern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Lilongwe, Malawi, 25 November - 2 December 1991 (I)
71. Agro-ecological land resources assessment for agricultural development planning. A case study of Kenya. Resources data base and land productivity. Main Report. Technical Annex 1: Land resources. Technical Annex 2: Soil erosion and productivity. Technical Annex 3: Agro-climatic and agro-edaphic suitabilities for barley, oat, cowpea, green gram and pigeonpea. Technical Annex 4: Crop productivity. Technical Annex 5: Livestock productivity. Technical Annex 6: Fuelwood productivity. Technical Annex 7: Systems documentation guide to computer programs for land productivity assessments. Technical Annex 8: Crop productivity assessment: results at district level. 1991. Main Report 71/9: Making land use choices for district planning, 1994 (I)
72. Computerized systems of land resources appraisal for agricultural development, 1993 (I)
73. FESLM: an international framework for evaluating sustainable land management, 1993 (I)
74. Global and national soils and terrain digital databases (SOTER), 1993. Rev. 1, 1995 (I)
75. AEZ in Asia. Proceedings of the Regional Workshop on Agro-ecological Zones Methodology and Applications, Bangkok, Thailand, 17-23 November 1991 (I)
76. Green manuring for soil productivity improvement, 1994 (I)
77. Onzième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Ségou, Mali, 18-26 janvier 1993 (F)
78. Land degradation in South Asia: its severity, causes and effects upon the people, 1994 (I)
79. Status of sulphur in soils and plants of thirty countries, 1995 (I)
80. Soil survey: perspectives and strategies for the 21st century, 1995 (I)
81. Multilingual soil database, 1995 (Multi)
82. Potential for forage legumes of land in West Africa, 1995 (I)
83. Douzième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Bangui, République Centrafricain, 5-10 décembre 1994 (F)
84. World reference base for soil resources, 1998 (I)
85. Soil Fertility Initiative for sub-Saharan Africa, 1999 (I)
86. Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean, 1999. (I)
87. AEZWIN: An interactive multiple-criteria analysis tool for land resources appraisal, 1999 (I)
88. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂, 2000 (E)
89. Land resources information systems for food security in SADC countries, 2000 (I)
90. Land resource potential and constraints at regional and country levels, 2000 (I)
91. The European soil information system, 2000 (I)
92. Carbon sequestration projects under the clean development mechanism to address land degradation, 2000 (I)
93. Land resources information systems in Asia, 2000 (I)
94. Lecture notes on the major soils of the world, 2001 (I)
95. Land resources information systems in the Caribbean, 2001 (I)
96. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra, 2002 (I E)

Disponibilidad: abril de 2002

E – Español
 F – Francés
 I – Inglés

Multil – Multilingüe
 ** Agotado

Dentro del marco del Protocolo de Kyoto, la captura de carbono para mitigar los efectos de los gases de invernadero en el ecosistema terrestre ha sido un tema importante de discusión en numerosas reuniones e informes internacionales. Este resumen enfoca el papel específico que los suelos de las áreas tropicales y de las zonas áridas pueden tener en la captura de carbono y en el manejo de las estrategias involucradas.

Se presenta una revisión de la dinámica del carbono y del papel fundamental de la materia orgánica en el suelo. Para aumentar la captura de carbono en los suelos en las zonas áridas y en las zonas tropicales, como una contribución para mitigar el CO₂ atmosférico global, son esenciales nuevas estrategias y nuevas prácticas para la agricultura, el uso de las pasturas y los bosques, incluyendo la agricultura de conservación y la agrosilvicultura. Tales prácticas deberían ser facilitadas por la aplicación del Artículo 3.4 del Protocolo de Kyoto o un acuerdo similar post-Kyoto que abarque las actividades adicionales en agricultura y forestación en los países en desarrollo y por medio de políticas apropiadas que deberían ser ampliamente promovidas. Se hacen algunas propuestas relacionadas con el buen manejo de la tierra para las tierras cultivadas, las pasturas y la agrosilvicultura de modo de promover la captura de carbono; su aplicación a las tierras degradadas es una prioridad. Se propone un método basado en una red de supervisión de suelos, para verificar y supervisar los cambios tanto sobre la captura de carbono como sobre el tenor de la degradación del suelo.

