

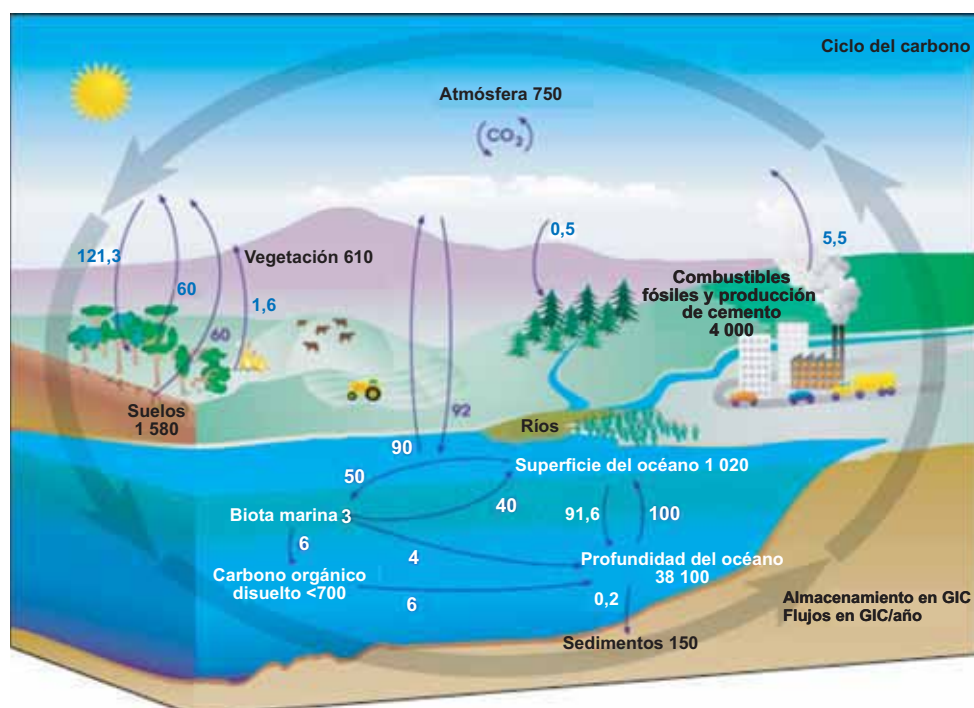
Capítulo 1

Introducción

CAMBIO CLIMÁTICO

La concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera se incrementó de 285 ppm al final del siglo XIX, antes de la revolución industrial, a alrededor de 366 ppm en 1998 (equivalente a un 28 por ciento de incremento) como consecuencia de las emisiones antropogénicas de alrededor de 405 ± 60 gigatoneladas de carbono (C) hacia la atmósfera (IPCC, 2001). Este incremento fue el resultado de la combustión de combustible fósil y la producción de cemento (67 por ciento) y el cambio en el uso de la tierra (33 por ciento). Actuando como sumideros de carbono, los ecosistemas marinos y terrestres han absorbido el 60 por ciento de estas emisiones, mientras que el 40 por ciento restante ha dado como resultado el incremento observado en la concentración atmosférica de CO_2 . La Figura 1 muestra las diferentes fuentes y flujos de carbono del balance global de este elemento. El incremento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera se reconoce ahora como un factor que contribuye al cambio climático (IPCC, 2001). Aunque aún existe incertidumbre con relación a las causas, consecuencias y magnitud del cambio climático, se cree que las actividades humanas están causando un serio impacto sobre el balance de energía de la tierra. Su influencia sobre el clima es de gran importancia desde el siglo XX. Esta importancia condujo en 1997 a un acuerdo internacional en Kyoto (el Protocolo de Kyoto), a través del cual la mayoría de los países fueron convocados a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera. En este contexto se han desarrollado nuevas estrategias y políticas en el

FIGURA 1
Principales depósitos y flujos del balance global del carbono



marco internacional para la implementación de prácticas de manejo de la agricultura y la silvicultura que mejoren la retención del carbono, tanto en la biomasa como en los suelos. Estas actividades se concluyen en los Artículos 3.3 y 3.4 del Protocolo de Kyoto y se conocen como «uso de la tierra, del cambio en el uso de la tierra y la silvicultura» (UTS) (IPCC, 2000).

La importancia de estas actividades es que cualquier acción tomada para secuestrar el C en la biomasa y los suelos, generalmente incrementaría el contenido de materia orgánica de estos últimos, lo cual en cambio tendría un impacto positivo sobre el medio ambiente, la agricultura y la biodiversidad de los ecosistemas. Las consecuencias de un incremento en el almacenamiento de carbono en el suelo pueden incluir incrementos en la fertilidad, productividad de la tierra para la obtención y seguridad de alimentos, así como prevención de la degradación del suelo. Por tanto, estas podrían constituir situaciones en las que todos salen ganando.

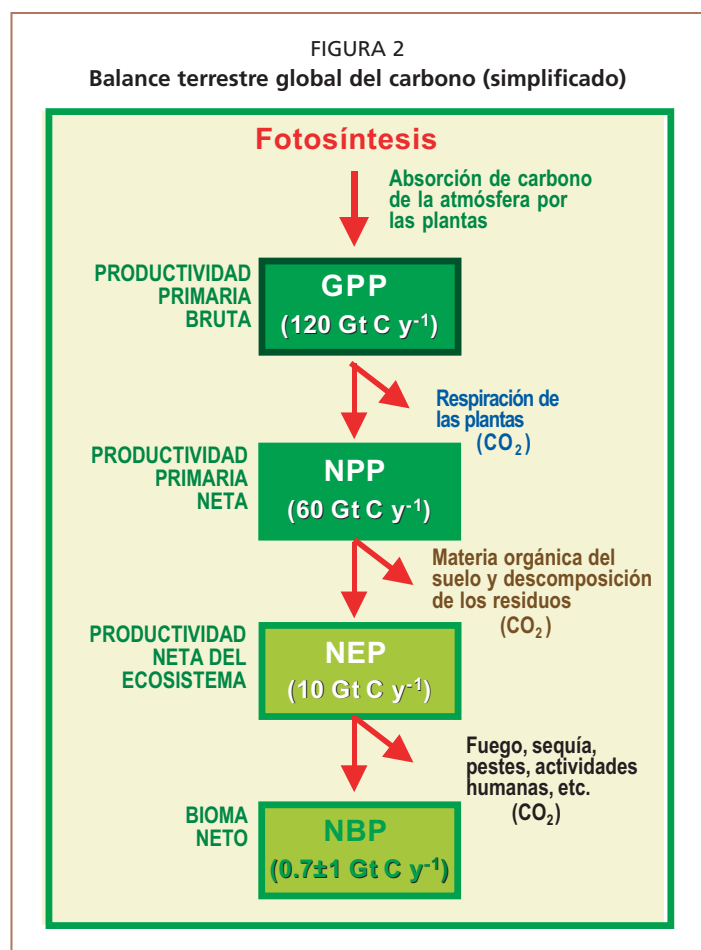
Un análisis adecuado del impacto del cambio climático debe considerar además otros aspectos globales, tales como la pérdida de biodiversidad, cambios en el uso de la tierra, la creciente demanda de alimentos y la degradación del suelo. Existen convenciones internacionales de las Naciones Unidas con relación a estos problemas: el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), la Convención de Lucha contra la Desertificación (CCD), la Convención Ramsar de Tierras Húmedas; también existen varios programas relacionados de las Naciones Unidas, p. ej. el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Otras iniciativas, como la Evaluación de Ecosistemas del Milenio, financiada internacionalmente por el Banco Mundial, el Fondo para el Medio

Ambiente Mundial (FMAM) y otras tienen el objetivo de determinar el estado de los ecosistemas de la tierra, tratando de tomar en consideración todos los problemas globales y las interacciones entre ellos.

EL CICLO TERRESTRE DEL CARBONO

Para entender el concepto de secuestro de carbono, la Figura 2 muestra un diagrama simplificado del balance de carbono en los ecosistemas terrestres. La entrada principal del C en la biosfera es a través del proceso de fotosíntesis o productividad neta primaria (PNP), o sea es la absorción de C de la atmósfera por las plantas. Parte de este C se pierde en varios procesos: a través de la respiración de las plantas (respiración autotrófica); como resultado de la descomposición de los desechos y la materia orgánica del suelo (respiración heterotrófica) y como consecuencia de pérdidas adicionales causadas por fuegos, sequía, actividades humanas, etc.

Actualmente, la biosfera constituye un sumidero de carbono que absorbe alrededor de 2,3 gigatoneladas de C



Fuente: adaptado de IPCC (2000).

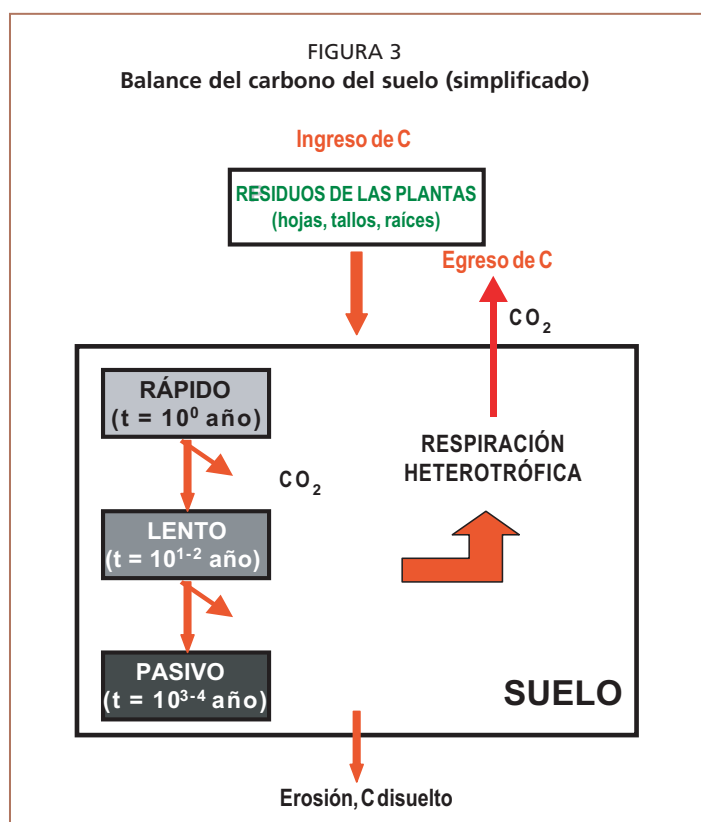
por año, lo cual representa alrededor del 30 por ciento de las emisiones de combustible fósil. El incremento de la concentración atmosférica de CO₂ estimula el proceso de fotosíntesis (actualmente limitada en sustrato) y consecuentemente el crecimiento de las plantas, como lo ha demostrado la investigación experimental (IPCC, 2000). El grado de esta estimulación varía de acuerdo con diferentes estimaciones, siendo mayor para los bosques (hasta 60 por ciento) y menor para los pastos y cultivos (alrededor del 14 por ciento). La evidencia científica actual sugiere que los bosques más antiguos actúan como sumideros de carbono activo, secuestrando el C a tasas de hasta 6 toneladas/ha/año (para bosques boreales o templados) (Valentín, Matteucci y Dolman, 2000).

Sin embargo, los bosques y ecosistemas en general pueden tener una capacidad limitada para acumular C. En primer lugar, debido a que la capacidad para secuestrar C está limitada por otros factores, tales como la disponibilidad de nutrientes (Oren, Ellsworth y Johnsen, 2001) y otros factores biofísicos. Segundo, la fotosíntesis puede tener un punto de saturación de CO₂, por encima del cual ésta no respondería a la concentración atmosférica de CO₂. Una tercera razón es que el cambio climático puede conducir a una degradación del ecosistema, limitando en cambio la capacidad de secuestrar el C. Aunque recientemente se ha logrado un gran progreso científico, estos procesos aún son escasamente entendidos. Por lo tanto, las predicciones de más de unas pocas décadas aún resultan altamente inciertas. Además, los bosques en ausencia de elementos perturbadores se espera que asimilen C durante 20-50 años después de su establecimiento y, por lo tanto, deberían considerarse como una opción temporal hasta que se desarrollen otras tecnologías para reducir las emisiones.

Muchos aspectos científicos relacionados con el ciclo global del carbono permanecen sin resolverse o son inciertos, tales como la contribuciones de los océanos al balance global de carbono (Del Giorgio y Duarte, 2002), la contribución de los ríos (Richey *et al.*, 2002), y la interacción con otros ciclos bioquímicos (Schimel, 1998). El cambio de la biosfera terrestre de su función actual como sumidero de carbono a fuente de carbono es altamente controversial, puesto que se basa en la sensibilidad a largo plazo de la respiración de los microbios del suelo al calentamiento global. Las predicciones a largo plazo empleando modelos bioclimáticos producen diferentes resultados en dependencia de la función de sensibilidad a la temperatura utilizada para la respiración heterotrófica. Una de estas simulaciones indicó que la capacidad de absorción de carbono de la biosfera estaba alcanzando su límite y que los bosques se convertirían en fuentes después de 50-150 años (Cox *et al.*, 2000). Otros hallazgos sugieren que, en base a los experimentos de calentamiento del suelo a largo plazo en la zona boreal, la respiración heterotrófica no es muy sensible a incrementos de la temperatura y que, por lo tanto, el futuro de los sumideros de carbono podría mantenerse (Falkowski, Acholes y Boyle, 2000). El calentamiento global podría conducir a un incremento de la respiración heterotrófica y a la descomposición de la materia orgánica y consecuentemente a un declive en la capacidad de los sumideros de los ecosistemas terrestres (Schimel, House y Hibbard, 2001). Se necesita investigar más antes de que se pueda llegar a alguna conclusión legítima. Aunque las estrategias para secuestrar el C podrían acogerse favorablemente, el uso de opciones de secuestro de carbono no debería desviarse del objetivo de reducir la dependencia que existe con respecto al combustible fósil, que en primera instancia constituye la causa principal del problema. El secuestro de carbono no debe verse como una vía para sustituir la necesidad y motivación de utilizar la energía de forma eficiente y de usar la energía renovable. En lugar de esto, el secuestro de carbono debe ser visto como algo positivo y además, como un proceso de transición hasta que se encuentren otras alternativas aceptables y compatibles con el medio ambiente.

LOS SUELOS Y EL SECUESTRO DE CARBONO

Los suelos son el mayor reservorio de carbono del ciclo terrestre de este elemento. La cantidad de C almacenada en los suelos es altamente significativa; los suelos contienen



alrededor de tres veces más C que la vegetación y dos veces más que el presente en la atmósfera (Batjes y Sombroek, 1997). Los suelos contienen mucho más C (1 500 Pg de C a 1 m de profundidad y 2 500 Pg de C a 2m; 1Pg = 1 gigatonelada) del que contiene la vegetación (650 Pg de C) y dos veces la cantidad que contiene la atmósfera (750 Pg de C) (Figura 1). El almacenamiento de carbono en los suelos es el balance entre la incorporación de material vegetal muerto (desecho de hojas y raíces) y las pérdidas de los procesos de descomposición y mineralización (respiración heterotrófica) (Figura 3). Bajo condiciones aeróbicas la mayor parte del C que se incorpora a los suelos es lábil y, por lo tanto, es devuelta a la atmósfera a través de los procesos conocidos como respiración del suelo o flujo de CO₂ (el resultado de la respiración de las raíces –la respiración autotrófica– y

la descomposición de la materia orgánica –respiración heterotrófica). Generalmente, solo el 1 por ciento de lo que ingresa al suelo (55 Pg/año) se acumula en fracciones más estables (0,4 Pg/año) con largo tiempo de residencia.

El proceso de secuestro o flujo de C en el suelo forma parte del balance global de carbono. Muchos de los factores que afectan el flujo de C dentro y fuera de los suelos son afectados por las prácticas de manejo que se implementan en ellos. Por lo tanto, las prácticas de manejo deben enfocarse en incrementar los ingresos y reducir las salidas de C en los suelos (Cuadro 1). El cambio en el contenido de carbono del suelo bajo diferentes prácticas de manejo se evidencia en los estudios de caso específicos que se muestran en el Capítulo 5.

El potencial a largo plazo del secuestro de carbono se determina no solamente mediante el incremento de los ingresos de C en el suelo, sino también mediante el tiempo medio de residencia en el depósito de carbono donde se encuentra almacenado.

CUADRO 1

Prácticas agrícolas para mejorar la productividad e incrementar la cantidad de carbono en los suelos

Prácticas tradicionales	Recomendadas
Cultivo con arado	Siembra directa o sin labranza
Eliminación de residuos o quema	Retorno de los residuos como cobertura
Barbecho de verano	Siembra de cultivo de cobertura
Pocos insumos no provenientes de la finca	Uso adecuado de fertilizantes y manejo integrado de nutrientes
Uso regular de fertilizantes	Manejo específico del suelo local
Falta de control de los recursos hídricos	Manejo/conservación de los recursos hídricos, irrigación, manejo de la capa freática
Cultivo cerco-a-cerco	Conversión de las tierras marginales en sitios de conservación natural
Monocultivo	Sistemas de cultivos mejorados con varias rotaciones de cultivos
Uso de la tierra a lo largo de las líneas de pobreza y fronteras políticas	Manejo integrado de las cuencas hidrogáficas
Drenaje de los humedales	Restauración de los humedales

Para el secuestro de carbono a largo plazo, el C tiene que ser liberado hacia grandes depósitos con tiempo de residencia media largo. La partición entre diferentes depósitos de carbono con diferente tiempo de residencia media es un controlador crítico del potencial de los ecosistemas terrestres para incrementar el almacenamiento de carbono a largo plazo. La asignación de C a depósitos con tiempo de residencia media corto, limita la cantidad de carbono almacenado a largo plazo, puesto que este es liberado rápidamente de vuelta a la atmósfera.

Un análisis adecuado del potencial de secuestro de carbono de una práctica de manejo debe considerar un balance total del carbono de la práctica si se va a emplear con el propósito de mitigación de este elemento. Otro problema es el costo de las prácticas agrícolas en términos de C. Las aplicaciones de fertilizantes, el riego y la aplicación de abonos, son todas prácticas que consumen C. Por tanto, una cuantificación total del carbono deberá tomar en cuenta todas las actividades asociadas con cada práctica en particular.

Además, otros gases de efecto invernadero, como el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) son influenciados por el uso de la tierra. Aunque se emiten en cantidades pequeñas, tienen un potencial de invernadero mayor. Por lo tanto, deberán cuantificarse de manera explícita e incluirse en el balance total. Un kilogramo de CH_4 tiene un potencial de calentamiento mundial 23 veces mayor que un kilogramo de CO_2 , en un período de 100 años, mientras que el potencial de calentamiento mundial de un kilogramo de N_2O es casi 300 veces mayor (Ramaswamy, Boucher y Haigh, 2001). Alrededor de un tercio de las emisiones de CH_4 y dos tercios de las emisiones de N_2O a la atmósfera provienen de los suelos (Prather *et al.*, 1995) y están relacionadas con las prácticas agrícolas.

NECESIDAD DE MODELOS PARA SIMULAR CAMBIOS EN EL CARBONO DEL SUELO

La materia orgánica del suelo es un indicador clave de la calidad del suelo; económicamente ya que mejora la productividad de las plantas y desde el punto de vista ambiental a causa del secuestro de carbono y la biodiversidad. La materia orgánica del suelo es un factor determinante en la actividad biológica del suelo, la cual a su vez, tiene un impacto primordial sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos (Robert, 1996). El incremento de la materia orgánica del suelo puede mejorar la agregación y la estabilidad de la estructura del suelo; la tasa de infiltración y la retención del agua; y la resistencia a la erosión.

El carbono del suelo se controla primeramente mediante dos procesos: producción primaria (ingreso) y descomposición (egreso). Las mediciones del almacenamiento de C en un ecosistema por sí solas, revelan poco acerca de como el C ha cambiado en el pasado o como cambiará en el futuro. El efecto del clima y/o el uso de la tierra pueden predecirse solamente a través del uso de modelos dinámicos precisos. La modelación se ha empleado como una metodología efectiva para analizar y predecir el efecto de las prácticas de manejo de la tierra sobre los niveles de C del suelo.

En las últimas dos décadas se han desarrollado un gran número de modelos basados en procesos para completar las tareas específicas de investigación. Cada modelo varía en su ajuste para la aplicación a nuevos contextos. En este sentido, se han realizado un gran número de comparaciones entre modelos, en particular por Smith *et al.*, (1997). La Red Europea de Materia Orgánica del Suelo también provee una descripción detallada de los múltiples modelos disponibles actualmente. Han sido desarrollados varios modelos para simular la dinámica del C en los suelos. La materia orgánica del suelo es muy compleja, formada por varias sustancias heterogéneas y asociadas generalmente con los minerales presentes en los suelos. El tiempo de residencia media del C en los suelos, varía desde uno o varios años (fracción lábil) a décadas, e incluso hasta más de 1 000 años (fracción estable). El tiempo de residencia media se determina

no solo mediante la composición química de la materia orgánica del suelo, sino también mediante el tipo de protección o unión dentro del suelo. La fracción de carbono estable está protegida, ya sea físicamente o químicamente. La protección física consiste en el encapsulado de los fragmentos de materia orgánica del suelo mediante partículas de arcilla y microagregados (Balescent, Chenu y Baladene, 2000). La protección química se refiere a uniones químicas específicas entre la materia orgánica del suelo con otros constituyentes, tales como los coloides o arcillas. Diferentes factores influyen a los distintos depósitos. Dada la complejidad de la naturaleza de la materia orgánica del suelo, la mayoría de los modelos describen el carbono orgánico del suelo como dividido en múltiples compartimientos paralelos con diferentes tiempos de residencia media (Figura 3). Tales compartimientos son en principio conceptualmente simples y han sido ampliamente usados. Un buen ejemplo es el modelo de carbono orgánico del suelo de Rothamsted que tiene cinco compartimientos: material vegetal degradable, material vegetal resistente, biomasa microbiana, humus y materia orgánica del suelo (Jenkinson y Rayner, 1977; Jenkinson, 1990). Otro modelo popular es el modelo CENTURY (Parton *et al.*, 1987; Parton, Stewardt y Cole, 1988), el cual tiene también compartimientos de carbono con parámetros similares. Aunque simples conceptualmente, el problema de estos modelos es que requieren información sobre el tamaño y la tasa de producción de cada compartimiento, lo que resulta difícil de obtener a partir de estudios de campo. Sin embargo, han brindado información útil sobre el efecto de la temperatura, la humedad y la textura del suelo sobre las producciones de C en el suelo. La FAO ha desarrollado un modelo como base metodológica para la evaluación de las cantidades de carbono y la predicción de los escenarios de captura de carbono que vinculan los modelos de simulación de producción de carbono orgánico del suelo (particularmente el CENTURY y el Rothamsted) a sistemas de información geográfica y procedimientos de medición en campo (FAO, 1999). No obstante, el potencial real de secuestro de carbono del suelo no se conoce, debido a la carencia de una base de datos confiable y a una escasa comprensión de la dinámica del carbono orgánico del suelo a escala molecular, local, regional y global (Metting; Smith y Amthor, 1999). La falta de evidencia científica segura y la dificultad para realizar la cuantificación del carbono evitó probablemente la inclusión explícita de los suelos en el Protocolo de Kyoto.

Se ha especulado que el manejo mejorado de la tierra en los próximos 50-100 años podría fijar hasta 150 Pg de C, equivalente a la cantidad liberada hacia la atmósfera desde mediados del siglo XIX como resultado de la conversión de la agricultura de pastizales, humedales y bosques (Houghton 1995; Lal *et al.*, 1998). Si esta cifra fuera real, sería un «ahorro de tiempo» para el desarrollo e implementación de una solución a largo plazo para el problema del CO₂. La evidencia que existe con relación a los experimentos a largo plazo revela que las pérdidas del C del suelo, como resultado de la oxidación y la erosión, pueden revertirse a través del manejo mejorado del suelo, tales labranza mínima y fertilización reducida (Rasmussen, Albrecht y Smiley, 1998; Sa *et al.*, 2001). Por tanto, las prácticas mejoradas de manejo de la tierra para incrementar la captura de carbono en los suelos, se han propuesto como una forma viable para reducir significativamente el contenido de C (Cole *et al.*, 1996; Rosenberg, Izaurrealde y Malone, 1999).

DEGRADACIÓN DEL SUELO

La degradación del suelo es un problema global (UNEP, 1992), especialmente la desertificación de las tierras áridas. La mayor parte de las tierras áridas se encuentran sobre suelos degradados (Capítulo 2) que han perdido cantidades significativas de C. Por lo tanto, el potencial para secuestrar el C a través de la rehabilitación de las tierras áridas es sustancial (FAO, 2001b). Lal (2000) estimó la magnitud del potencial para secuestrar el C de suelos en ecosistemas terrestres con 50-75 por ciento de pérdidas de carbono histórico. Además, Lal propuso la hipótesis de que el incremento anual

en la concentración atmosférica de CO₂ podría equilibrarse mediante la restauración de 2 000 000 000 ha de tierras degradadas, para incrementar su contenido de carbono promedio mediante 15 toneladas/ha en los suelos y la vegetación. Los beneficios serían enormes. Mejorar el secuestro de carbono en las tierras agrícolas degradadas podría tener beneficios ambientales, económicos y sociales para sus habitantes. Por lo tanto, las iniciativas para secuestrar el C son bien recibidas en el mejoramiento en los suelos degradados, la productividad de las plantas y la consecuente seguridad alimentaria y mitigación de la pobreza en las regiones áridas.

Los efectos de la degradación del suelo y la desertificación afectan el ciclo global del C. El cambio en el uso de la tierra conduce a la pérdida de la cubierta vegetal y la pérdida subsecuentemente del C en los suelos, así como de la calidad de los mismos. Los procesos de productividad de las plantas, degradación del suelo y secuestro de carbono están estrechamente vinculados. Una disminución en la calidad del suelo conduce a la reducción en la reserva de C orgánico del suelo y a un incremento en la emisión de CO₂ hacia la atmósfera. La disminución de la calidad del suelo y su estructura conduce además a la pérdida en la capacidad de retención del agua y, por lo tanto, de la productividad de las plantas.

Las tierras áridas tienen características particulares que afectan su capacidad para fijar el C. El Capítulo 2 muestra las características principales y la distribución de las tierras áridas en el mundo. Los Capítulos 3 y 4 describen los sistemas agrícolas y los aspectos biofísicos de la captura de carbono en las tierras áridas. El Capítulo 5 resume varios estudios de caso en países donde se han ejecutado diferentes simulaciones para estimular el cambio en el C del suelo bajo diferentes opciones de manejo. El Capítulo 6 analiza los fondos existentes para proyectos de captura de carbono. Las conclusiones se presentan en el Capítulo 7.