



¿LA SOLUCIÓN NATURAL?

EL PAPEL DE LOS ECOSISTEMAS EN LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

EVALUACIÓN RÁPIDA DEL PNUMA

Kate Trumper
Monika Bertzky
Barney Dickson
Geertje van der Heijden
Martin Jenkins
Pete Manning

PREFACIO

En la actualidad, los ecosistemas mundiales, en lugar de mantener y aumentar la capacidad de la naturaleza para capturar y almacenar carbono, se están agotando a un ritmo alarmante.



CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO: A LA MANERA DE LA NATURALEZA

Una respuesta al urgente y dramático desafío que significa el cambio climático ha sido el interés, cada vez mayor, demostrado por los gobiernos en la captura y almacenamiento del carbono en centrales eléctricas. Se han destinado miles de millones de dólares al desarrollo de tecnología para eliminar los gases de efecto invernadero de las emisiones de chimeneas enterrándolas en el subsuelo.

En este Reporte de Evaluación Rápida, encomendada por el PNUMA, se presenta a la captura y al almacenamiento del carbono desde la óptica de la economía verde esbozando el potencial de los sistemas naturales, desde bosques hasta pastizales, que han realizado esta tarea durante milenios con demostrada eficacia.

En la actualidad los ecosistemas mundiales, en lugar de mantener y aumentar la capacidad de la naturaleza para capturar y almacenar carbono, se están agotando a un ritmo alarmante.

Alrededor de veinte por ciento de las emisiones de gases de efecto invernadero son consecuencia del clareo y quema de los bosques. Por otra parte, el vasto depósito de carbono de las turbas y de la tundra está amenazado por la desecación, en el caso de las primeras, y por el derretimiento, en la segunda, y muchos suelos agrícolas están degradados o en proceso de degradación.

Salvaguardar y restaurar el carbono en tres sistemas —bosques, turbas y agricultura— podría reducir, en las próximas décadas, más de 50 gigatoneladas (Gt) de emisiones que de otro modo llegarían a la atmósfera. Otros, como los pastizales y sistemas costeros, como los manglares, también pueden contribuir en esta tarea.

Los múltiples beneficios de estas inversiones van desde la mejora de la calidad de vida y los medios de subsistencia, pasando por la creación de empleos en áreas como conservación, gestión, vigilancia y rehabilitación, revertir la tasa de pérdida de la biodiversidad y aumentar el abasto de agua, hasta la estabilización de suelos de gran valor.

El año 2009 será testigo de negociaciones fundamentales sobre la manera en que el mundo enfrentará el cambio climático, cuando los gobiernos se reúnan en la conferencia de Naciones Unidas sobre este fenómeno, que se celebrará en Copenhague, Dinamarca, en diciembre.

Los tres mil millones de dólares estadounidenses en paquetes de incentivos, movilizados para revertir el declive de la economía mundial, representan la oportunidad de Sellar un Acuerdo significativo en materia climática y, tal vez, también de acelerar la transición a una economía verde, con bajos niveles de emisiones de carbono, que pueda enfrentar desafíos diversos, desde crisis alimentarias, de combustibles y climáticas, hasta la incipiente escasez de recursos naturales.

Existe mucho optimismo acerca de que los gobiernos presentes en Copenhague llegarán al acuerdo de empezar a pagar a los países en desarrollo para la Reducción de sus Emisiones de Carbono Causadas por la Deforestación y la Degradación de los Bosques (REDD, por sus siglas en inglés).

Este informe, compilado para el Día Mundial del Medio Ambiente, el 5 de junio, destaca el gran potencial de los sistemas naturales, el que no sólo sirve para combatir el cambio climático, sino, también, para proteger a las economías vulnerables de los efectos adversos del clima, para acelerar el desarrollo sostenible y la consecución de los Objetivos de Desarrollo del Milenio relacionados con la pobreza.

Achim Steiner

Subsecretario General de las Naciones Unidas y Director Ejecutivo del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).



CONTENIDO

- 3 PREFACIO
- 7 RESUMEN EJECUTIVO

- 11 INTRODUCCIÓN

- 23 GESTIÓN DEL CARBONO EN ECOSISTEMAS NATURALES

- 39 GESTIÓN DEL CARBONO EN ECOSISTEMAS DOMINADOS POR EL SER HUMANO

- 48 EFECTOS DEL FUTURO CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CARBONO DE LOS ECOSISTEMAS

- 51 OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS

- 61 CONCLUSIONES

- 64 GLOSARIO
- 66 CONTRIBUCIONES Y REVISORES
- 67 REFERENCIAS

El PNUMA promueve prácticas ambientalmente racionales a nivel mundial y en sus propias actividades. Esta publicación está impresa, totalmente, en papel reciclado, certificada por el FSC, sin residuos de post-consumo y libre de cloro.



RESUMEN EJECUTIVO

Se requieren reducciones muy grandes en las emisiones de gases de efecto invernadero si queremos evitar los peores efectos del cambio climático en el mundo. En este informe se describe la contribución fundamental que los ecosistemas pueden y deben hacer para materializar este esfuerzo.

A fin de mantener los aumentos de la temperatura promedio en menos de 2°C, las emisiones globales deben reducirse, para 2050, hasta 85 por ciento con respecto a los niveles de 2000, y su punto máximo no tiene que ir más allá de 2015, de acuerdo con el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

Sin embargo, en vez de disminuir, la tasa de emisiones de gases de efecto invernadero va en aumento. De acuerdo con los cálculos más recientes, en la actualidad las actividades humanas son responsables de alrededor de 10 Gt de emisiones de carbono al año en todo el mundo; de esta cantidad, aproximadamente 1.5 Gt son consecuencia del cambio en el uso del suelo y el resto de la producción de cemento (Canadell *et al.*, 2007). Esto ha provocado una tasa anual promedio de incremento en las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera de poco menos de 2 ppm para el periodo 1995-2000, en comparación con las 1.25 ppm, aproximadamente, para el periodo 1960-1995 (IPCC, 2007b).

Serán necesarios grandes esfuerzos para revertir esta tendencia, tarea imposible si no se abordan las pérdidas de carbono procedentes de ecosistemas como los bosques y las turbas. La gestión de los ecosistemas para mantener sus reservas de carbono no sólo puede reducir las emisiones de dicho gas, sino

también absorber activamente el dióxido de carbono presente en la atmósfera. Restaurar algunas de las grandes cantidades de carbono perdidas en los suelos, en particular en tierras agrícolas y en las áridas, es lo que tiene el mayor potencial. Una meta difícil, pero alcanzable, es lograr que la agricultura sea neutra en emisiones de carbono para 2030. Hoy en día, esta solución natural es la única opción viable para absorber el carbono de la atmósfera; las tecnologías para la captura y almacenamiento del carbono sólo son adecuadas para las fuentes fijas concentradas, como las centrales eléctricas.

La gestión del carbono en los ecosistemas también puede ser una estrategia rentable. Sin subsidios perversos que apoyen otros usos del suelo, el costo de reducir la deforestación y rehabilitar las turbas puede ser bajo. En general, los costos son modestos si los comparamos con las opciones de energía limpia.

Existen, además, muchas oportunidades para alcanzar otros objetivos sociales, como tierras agrícolas más fértiles, la creación de nuevos empleos y oportunidades de generar ingresos, y la contribución a la conservación de la biodiversidad. Hace falta una comprensión más clara de los beneficios y los costos de la gestión del carbono en los ecosistemas, para tomar decisiones informadas sobre el uso del suelo.



8

También habrá que considerar algunos riesgos y la incertidumbre que esto acarrea. Algunos reservorios de carbono en los ecosistemas podrían perderse a causa del impacto del propio cambio climático y a los cambios en el uso del suelo. A la larga, todos los depósitos, tal vez con excepción de la turba, se saturarán. Aún no se tiene certeza sobre las cantidades capturadas en los diferentes regímenes de gestión y hay una considerable variabilidad entre las áreas, además de que se requiere mucho trabajo para determinar cuál es la mejor manera de gestionar y vigilar el carbono. Si bien se destaca a los bosques, a la agricultura y a las turbas como prioridades urgentes, el papel de otros ecosistemas también es importante y no se debe soslayar.

El establecimiento de políticas a gran escala para la gestión del carbono en los ecosistemas presenta grandes desafíos, lo que plantea importantes asuntos institucionales y de regulación, así como complejos dilemas políticos y socioeconómicos. En particular, una política eficaz deberá lograr un equilibrio entre los medios de subsistencia rurales y las políticas de gestión del carbono que podrían amenazar esos medios. Es difícil asegurar que las recompensas por una buena gestión del carbono lleguen a las comunidades partícipes. Por lo tanto, algo muy importante

es no dejar de escuchar las voces de los pueblos rurales pobres e indígenas por la prisa de garantizar ganancias en la captura de carbono.

Los mensajes clave de este informe son:

- Es fundamental gestionar el carbono en los sistemas biológicos, salvaguardar las reservas de carbono actuales, reducir las emisiones y maximizar el potencial de las áreas naturales y agrícolas para absorber el carbono de la atmósfera.
- Los sistemas prioritarios son los bosques tropicales, las turbas y la agricultura. Reducir 50 por ciento las tasas de deforestación para 2050, y luego mantenerlas en ese nivel hasta 2100, evitaría la emisión directa de hasta 50 Gt de carbono en este siglo, lo que equivale a 12 por ciento de la reducción de emisiones necesaria que mantendrá concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono inferiores a 450 ppm.
- La degradación de las turbas contribuye con unas 0.8 Gt C al año, lo que en podría evitarse, en buena medida, mediante su rehabilitación. En términos generales, el sector agrícola podría ser neutro en emisiones de

carbono para 2030, con la adopción de prácticas de gestión óptimas (equivalentes a hasta 2 Gt C al año).

- Es esencial que la política de mitigación del cambio climático se rija por la mejor información científica disponible sobre el carbono en los ecosistemas, y que las decisiones se basen en información sobre los costos y beneficios generales de dicha gestión.
- Formular políticas para lograr estos fines es un desafío: será necesario asegurar que las comunidades locales e indígenas no resulten perjudicadas y considerar el potencial para lograr beneficios conjuntos para la biodiversidad y los servicios que brindan los ecosistemas. Las tierras áridas, en particular, ofrecen oportunidades para combinar la gestión del carbono y la rehabilitación de tierras.
- La adopción de un marco político global bajo el CMNUCC, para abordar la gestión del carbono en los ecosistemas, representaría un avance muy significativo.

9



INTRODUCCIÓN

LA NECESIDAD DE LA GESTIÓN DEL CARBONO EN LOS ECOSISTEMAS

El clima de la Tierra depende de la composición de la atmósfera, en particular, de la concentración de gases de efecto invernadero, los cuales aumentan la cantidad de calor solar retenido. Los más importantes son el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4). Ambos se encuentran de forma natural en la atmósfera, como parte del ciclo del carbono, pero su concentración se ha incrementado mucho a causa de las actividades humanas, en particular desde la industrialización. Hay más dióxido de carbono en la atmósfera ahora que en cualquier otro momento en los últimos 650000 años. En 2006, la concentración promedio mundial de CO_2 en la atmósfera era de 381 partes por millón (ppm), en comparación con 280 ppm cuando empezó la Revolución Industrial, alrededor de 1750. El ritmo al que está creciendo esta concentración es el más alto desde que se le comenzó a dar seguimiento continuo en 1959 (Canadell *et al.*, 2007).

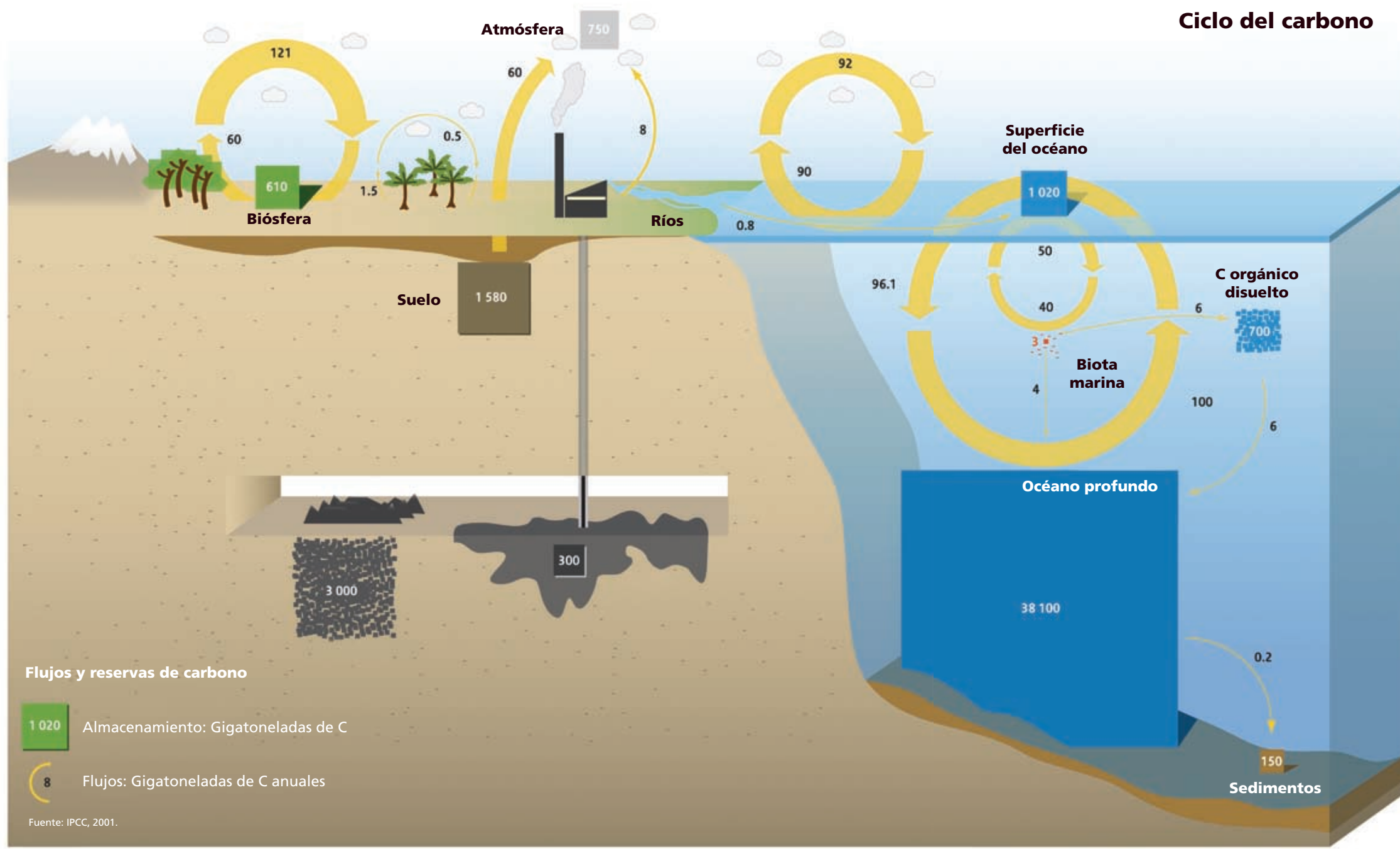
El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático afirma que para limitar el aumento de la temperatura mundial a un rango de 2-2.4°C y evitar así los peores efectos del cambio climático, es necesario que las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera se establezcan en 445-490 ppm de CO_2 equivalentes (CO_2e , véase recuadro) o menos (IPCC, 2007b). Debido a que en la actualidad las concentraciones son de alrededor de 430 ppm CO_2e , esto significa que se deberán limitar los futuros aumentos entre 15 y 60 ppm (Cowie *et al.*, 2007; Eliasch, 2008).

Nota sobre unidades y cantidades

1 gigatonelada de carbono (GtC) = 10^9 toneladas de carbono (tC). ¿Carbono (C) o dióxido de carbono (CO_2)? El carbono tiene un efecto en el cambio climático cuando está en forma de dióxido de carbono. Sin embargo, como es el carbono el que tiene un ciclo en la atmósfera, en los organismos vivos, en los océanos y en el suelo, en este informe expresamos las cantidades en términos de carbono. Una tonelada de carbono equivale a 3.67 toneladas de CO_2 . El ciclo mundial del carbono (véase la siguiente página) ilustra cómo se desplaza y acumula el carbono en ecosistemas terrestres y marinos, además de la atmósfera.



Ciclo del carbono



El CO₂ equivalente (CO₂e) es una medida del potencial de calentamiento global que permite que todos los gases de efecto invernadero puedan compararse de acuerdo a un parámetro común: el del dióxido de carbono. Por ejemplo, el metano es un gas de efecto invernadero alrededor de 25 veces más potente que el dióxido de carbono, de modo que una tonelada de metano se puede expresar como 25 toneladas de CO₂e.

EL CARBONO EN LOS SISTEMAS VIVIENTES

Los sistemas vivos desempeñan un papel fundamental en el ciclo del carbono. Los organismos fotosintéticos –en su mayoría plantas terrestres y varios tipos de algas y bacterias en el mar– usan el dióxido de carbono atmosférico o el disuelto en el agua de mar como base para formar los complejos compuestos de carbono orgánico que son esenciales para la vida. La gran mayoría de los organismos, incluidos los fotosintéticos, produce dióxido de carbono durante la respiración (la desagregación de los compuestos de carbono orgánico para liberar la energía utilizada por las células vivas). La combustión de los compuestos de carbono también libera dióxido de carbono. El metano es producido por cierto tipo de microorganismos como resultado de su respiración en ambientes con baja concentración de oxígeno, por ejemplo, en marismas estancadas y los intestinos de los rumiantes, incluidas reses, borregos y cabras. A la larga, el metano presente en la atmósfera se oxida y produce dióxido de carbono y agua.

En la biosfera, una cantidad considerable de carbono se “almacena” efectivamente en los organismos vivos (por convención, llamados biomasa), así como en cadáveres y restos no descompuestos, o parcialmente descompuestos, en el suelo, en el fondo del mar o en roca sedimentaria (desde luego, los combustibles fósiles no son sino los restos de organismos que murieron hace largo tiempo).

Cuando la cantidad de carbono atmosférico que se fija por medio de la fotosíntesis es equivalente a la emitida a la atmósfera por los organismos que respiran y por la combustión



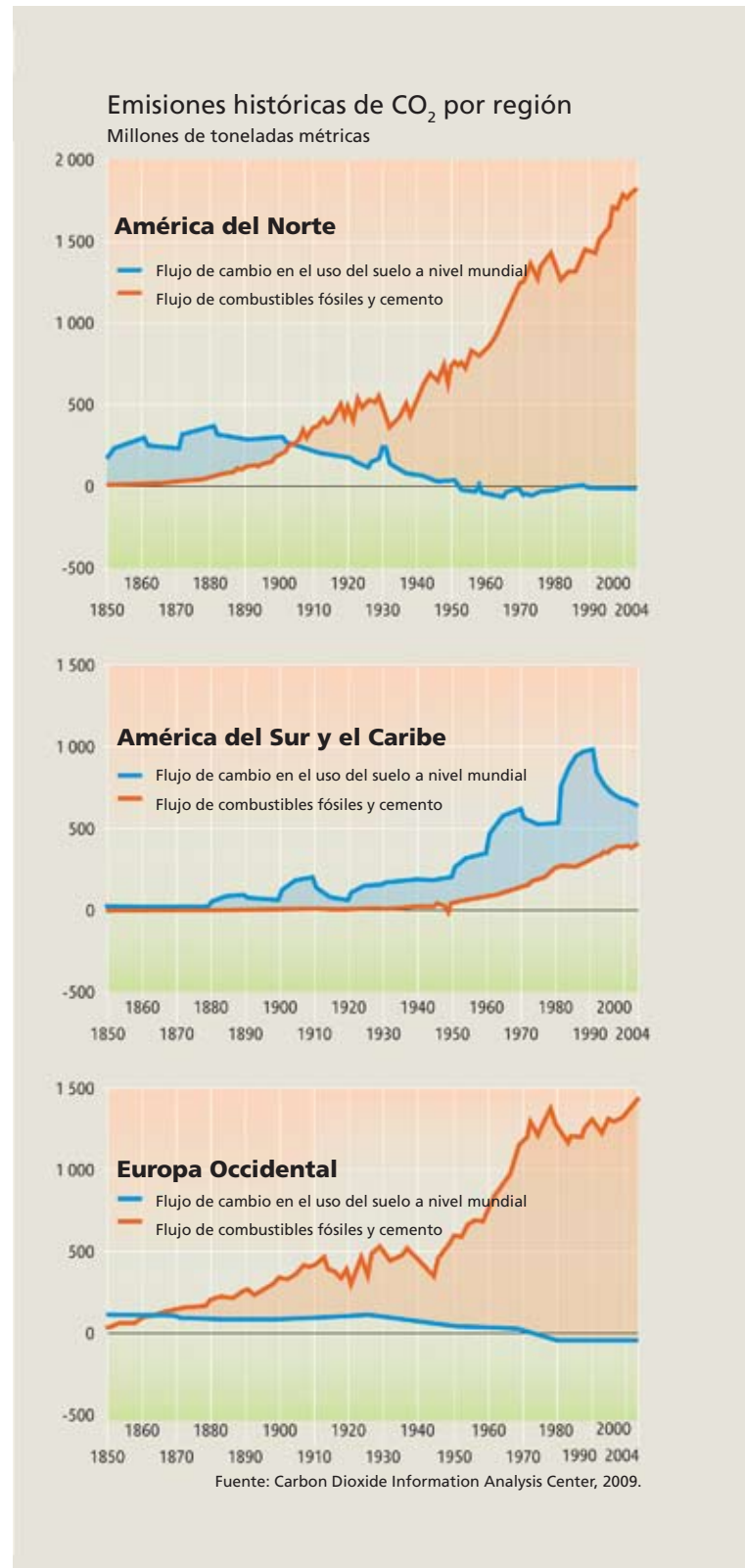
del carbono orgánico, la parte viviente, o biótica, del ciclo del carbono alcanza un equilibrio y las concentraciones de CO₂ y de CH₄ se mantienen relativamente constantes (aunque su concentración se verá afectada por otras partes del ciclo del carbono, en especial la actividad volcánica y la disolución y precipitación del carbono inorgánico en el agua).

Sin embargo, a menudo el sistema puede no estar en equilibrio, al menos a escala local. Un área puede ser un sumidero de carbono si éste se acumula a mayor velocidad de la que se emite. En cambio, un área es una fuente de carbono si produce carbono atmosférico a mayor velocidad de la que se fija ahí. En los ecosistemas terrestres, el hecho de que un área sea un sumidero o una fuente depende en gran medida del equilibrio entre la tasa fotosintética y la tasa combinada de respiración y combustión.

La cantidad de carbono almacenado, la forma en que se almacena y la tasa de rotación –es decir, la tasa a la que el carbono se fija orgánicamente o se emite como dióxido de carbono o metano– varía mucho de un lugar a otro, dependiendo de una serie de condiciones, entre las que destacan el clima (sobre todo la temperatura y, en tierra, la precipitación) y la disponibilidad de nutrientes. El cambio climático tendrá de por sí un efecto en la distribución natural de los biomas y los ecosistemas, así como en el ciclo del carbono a escala mundial y local.

EFFECTOS ANTROPOGÉNICOS EN EL CICLO DEL CARBONO

Los seres humanos están afectando el ciclo del carbono de varias maneras. La quema de grandes cantidades de combustibles fósiles emite a la atmósfera carbono orgánico largamente almacenado y la producción de cemento genera carbono atmosférico mediante la combustión del carbonato de calcio. Muchos cambios en el uso del suelo también tienden a elevar la cantidad de carbono atmosférico; la conversión de ecosistemas naturales en áreas para uso humano (agricultura, pastoreo, terrenos para construcción, etcétera) por lo general supone la transición de un área de almacenamiento de carbono relativamente alto (muchas veces selvas o bosques) a una de menor almacenamiento de carbono. El exceso de carbono a



menudo se emite por medio de la combustión. Desde el punto de vista de la regulación climática, la mayor producción ganadera, en especial de rumiantes, tiene un efecto particularmente marcado porque aumenta la producción de metano, gas de efecto invernadero muy potente.

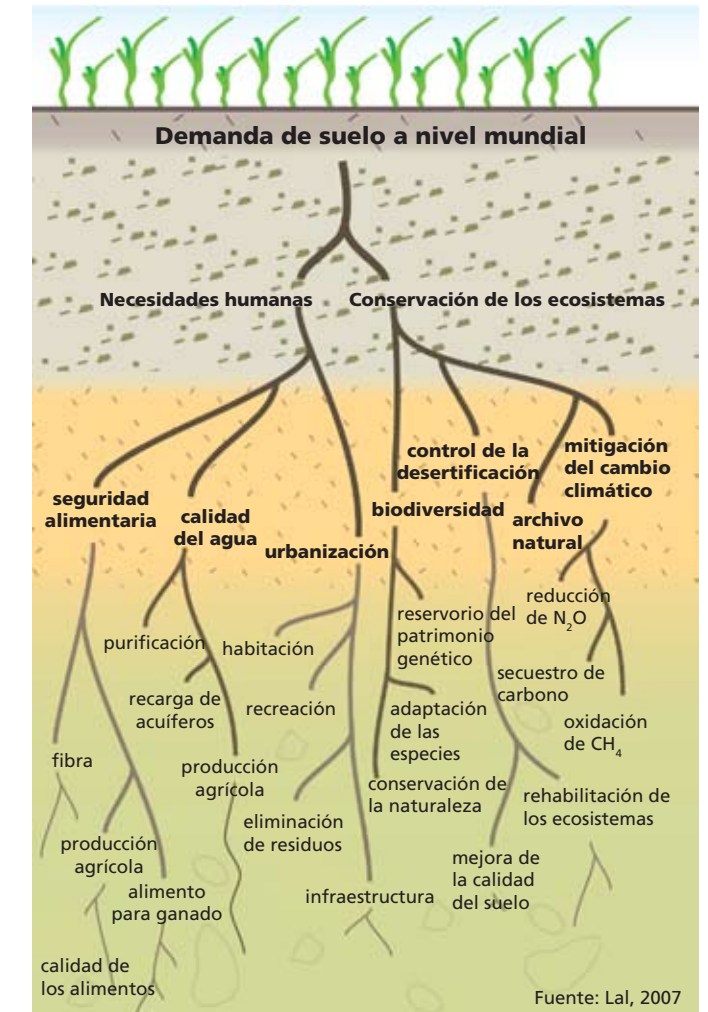
Se calcula que desde 1850 se deben haber emitido a la atmósfera poco menos de 500 Gt de carbono como consecuencia de acciones humanas. Alrededor de tres cuartas partes de esta cantidad se atribuyen al uso de combustibles fósiles; la mayor parte restante se deben al cambio en el uso del suelo y 5 por ciento a la producción de cemento. Del total, se piensa que alrededor de 150 Gt han sido absorbidas por los océanos, entre 120 y 130 Gt por los sistemas terrestres, y el resto ha permanecido en la atmósfera (Houghton, 2007).

De acuerdo con los cálculos más recientes, las actividades humanas son responsables, en la actualidad, de alrededor de 10 Gt de emisiones de carbono al año en todo el mundo. De esa cantidad, aproximadamente, 1.5 Gt fueron consecuencia del cambio en el uso del suelo y el resto del uso de combustibles fósiles y la producción de cemento (Canadell *et al.*, 2007). Esto ha ocasionado una tasa anual promedio de aumento en las concentraciones de dióxido de carbono atmosférico de poco menos de 2 ppm para el periodo 1995-2005, en comparación con alrededor de 1.25 ppm para el periodo 1960-1995 (IPCC, 2007b).

ESTABILIZACIÓN O REDUCCIÓN DE LA CANTIDAD DE CARBONO ATMOSFÉRICO

En esencia, la estabilización o reducción de la cantidad de carbono atmosférico se puede lograr de dos formas: reduciendo la tasa de emisión o aumentando la tasa de absorción. Casi con seguridad, para que una estrategia tenga éxito se requiere la adopción de ambas, así como la contribución de todos los sectores (Cowie *et al.*, 2007; Eliasch, 2008).

Las emisiones pueden reducirse disminuyendo el uso de combustibles fósiles, la producción de cemento o los cambios



adversos (que liberan carbono) en el uso del suelo, o una combinación de todo esto.

Se puede absorber el dióxido de carbono de la atmósfera por medios mecánicos o biológicos. La absorción mecánica, llamada captura y almacenamiento de carbono (CAC), implica la recolección de las emisiones de CO₂ procedentes de combustibles fósiles en fuentes concentradas, como centrales eléctricas y plantas cementeras, y su almacenamiento en formaciones geológicas como campos petroleros agotados

(IPCC, 2005). Los mecanismos biológicos explotan la capacidad, antes mencionada, de los organismos fotosintéticos para capturar el CO₂ y acumularlo, como biomasa o como materia orgánica, en sedimentos de varios tipos.

Por consiguiente, la gestión biológica del carbono para enfrentar el cambio climático consta, en esencia, de dos componentes: la reducción de emisiones de los sistemas biológicos y el aumento de su capacidad para almacenar carbono. Esto se puede lograr de tres maneras: proteger los reservorios que ya existen y reducir la tasa de pérdida actual; reabastecer los reservorios históricamente agotados rehabilitando los ecosistemas y los suelos; y crear, nuevos reservorios fomentando un mayor almacenamiento de carbono en áreas que hoy tienen poco, por ejemplo, mediante la reforestación. En este informe, consideramos el papel que los ecosistemas naturales y los dominados por el ser humano pueden desempeñar en la reducción de emisiones y la absorción del carbono de la atmósfera (a lo que nos referiremos como “secuestro biológico”).

De estar bien diseñada, la estrategia biológica para la gestión del carbono puede ofrecer otros beneficios. Los ecosistemas naturales, en especial los bosques, a menudo son ricos en biodiversidad y en carbono; proteger a uno de ellos puede servir para cuidar ambos (UNEP-WCMC, 2008; Miles & Kapos, 2008). También, pueden ofrecer otros servicios como estabilización del suelo, mejoramiento del clima local y reciclaje de productos residuales. La buena gestión de estos ecosistemas, y la de los sistemas agrícolas, puede generar beneficios en lo que respecta a la disponibilidad de agua y nutrientes, y revertir la degradación del suelo, lo que tiene efectos positivos en los medios de subsistencia y ayuda a reducir la pobreza (Lal, 2007; Smith *et al.*, 2007a).

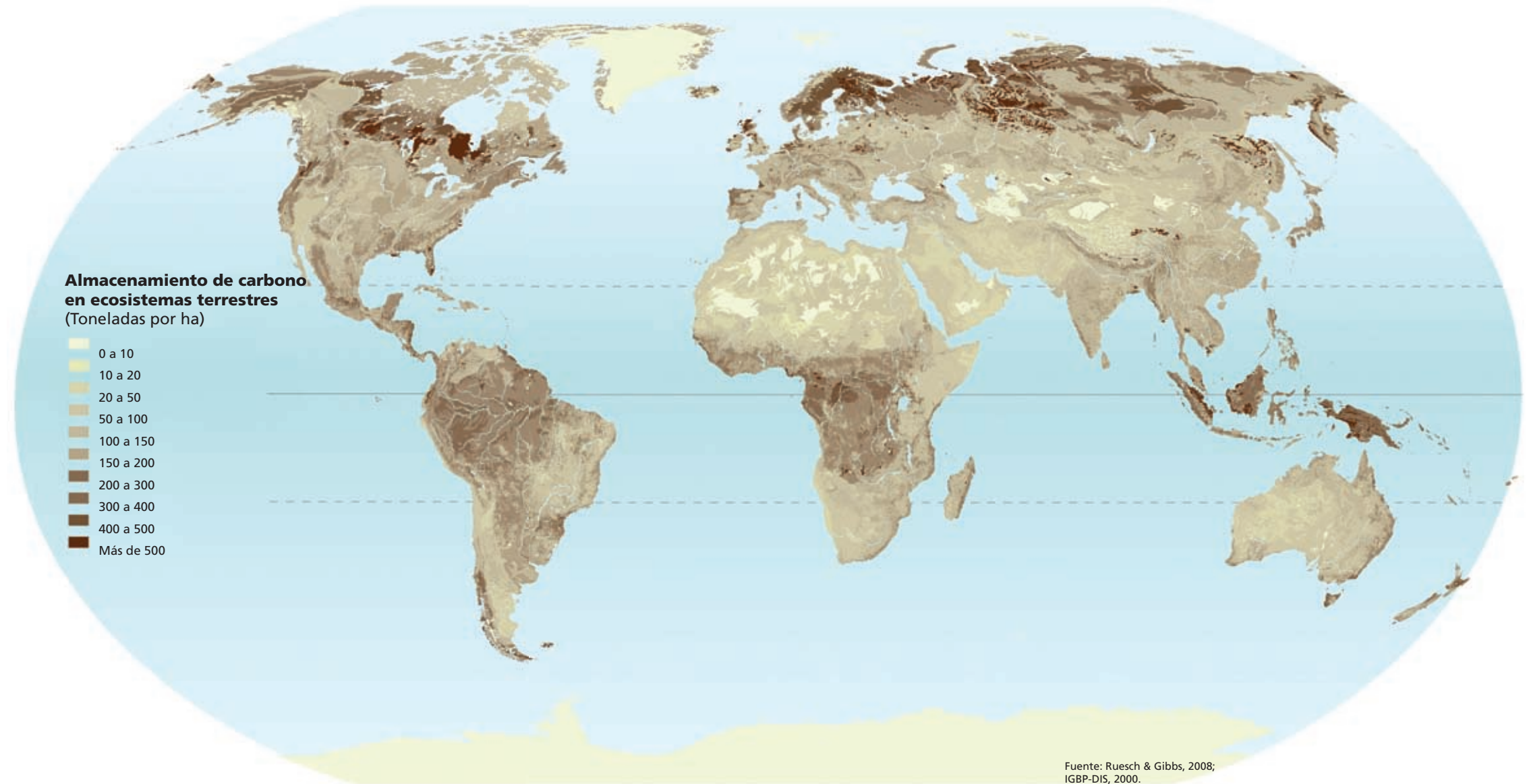
Lo anterior no significa que la gestión del carbono en los ecosistemas sea tarea fácil. Entraña complejos desafíos técnicos, sociales y económicos, así como algunos riesgos de consecuencias no deseadas. En este informe examinaremos el estado de los conocimientos sobre su potencial y sus desafíos.

RESERVAS ACTUALES DE CARBONO EN LA BIOMASA Y EL SUELO



Los ecosistemas terrestres almacenan casi el triple del carbono que hay en la atmósfera. Los bosques tropicales y boreales representan los mayores reservorios. El mantenimiento de los reservorios de carbono que ya existen figura entre las principales prioridades en la lucha por mitigar el cambio climático.

18



Los ecosistemas terrestres almacenan alrededor de 2100 Gt C en organismos vivos, hojarasca y materia orgánica del suelo, lo que equivale casi al triple del que se encuentra presente en la atmósfera. Los diferentes tipos de ecosistemas almacenan distintas cantidades de carbono dependiendo de la composición de sus especies, el tipo de suelo, el clima y otras características.

Este mapa siguiente es el mejor disponible de la distribución en tierra del carbono. Combina datos, a escala mundial, del carbono almacenado en la biomasa (Ruesch & Gibbs, 2008) con otros datos sobre el carbono en el suelo, a un metro de profundidad (IGBP-DIS, 2000, probablemente esto subestima el carbono almacenado en los suelos de turba). El mapa muestra que las

mayores cantidades de carbono se almacenan en los trópicos, sobre todo como biomasa, y en los ecosistemas de latitudes elevadas, donde las reservas se ubican, en gran medida, en las capas de suelo permanentemente congeladas (*permafrost*) y en la turba.

19

Carbono almacenado por bioma
(Gigatoneladas de C)

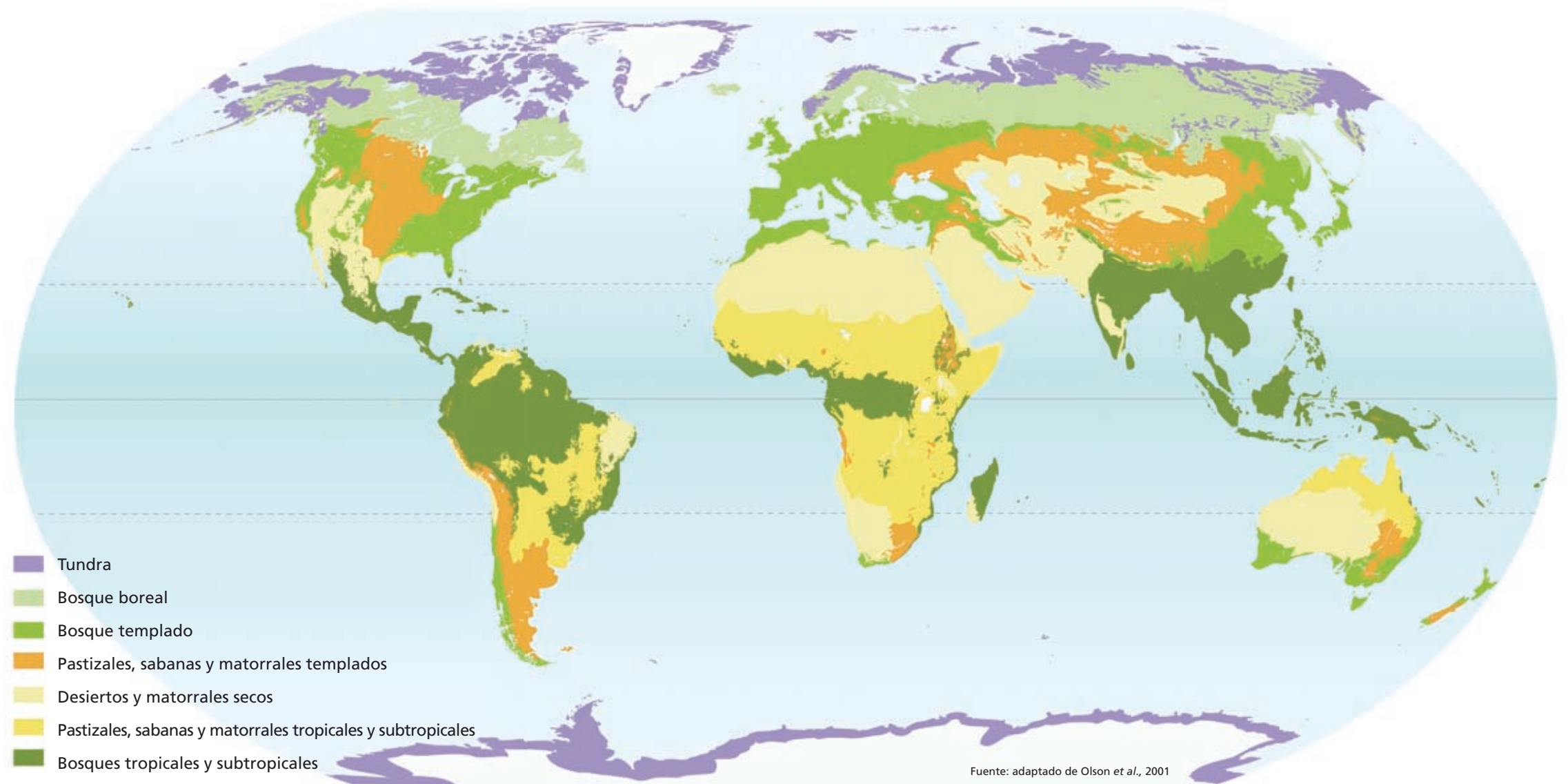


Fuente: UNEP-WCMC, 2009.

Dividiendo al mundo en siete biomas, calculamos que los bosques tropicales y subtropicales almacenan la mayor cantidad de carbono, casi 550 Gt. Sigue el bioma del bosque boreal,

con reservas de carbono de alrededor de 384 Gt. Aunque los desiertos y los matorrales secos tienen muy poca biomasa superficial, son reservorios importantes de carbono en el suelo

y abarcan áreas muy extensas, de modo que es notable su contribución total al almacenamiento de carbono. Por su parte, el bioma de la tundra cubre el área más pequeña, pero tiene la densidad más alta de almacenamiento.



- Tundra
- Bosque boreal
- Bosque templado
- Pastizales, sabanas y matorrales templados
- Desiertos y matorrales secos
- Pastizales, sabanas y matorrales tropicales y subtropicales
- Bosques tropicales y subtropicales

Fuente: adaptado de Olson et al., 2001



GESTIÓN DEL CARBONO EN ECOSISTEMAS NATURALES

Los ecosistemas pueden agruparse en biomas que reflejan las diferencias geográficas en suelos y clima y, en consecuencia, los diferentes tipos de vegetación (Woodward *et al.*, 2004). Estos biomas difieren en su capacidad para asimilar y almacenar el carbono (De Deyn *et al.*, 2008). Además del balance entre las ganancias de carbono obtenidas con el crecimiento y las pérdidas ocurridas durante la respiración, el equilibrio del carbono en los ecosistemas también está regulado por varios otros factores, entre ellos, el fuego, los herbívoros, la erosión y la lixiviación. En este apartado abordaremos los reservorios de carbono y la capacidad de cada bioma, turbas, costas y océanos, examinaremos los efectos de las actividades humanas en ellos y su papel en el ciclo del carbono.



TUNDRA

Los ecosistemas de tundra son densos en contenido de carbono. Tienen poco potencial para almacenar más, pero podría perderse una enorme cantidad de éste si se derritiera el *permafrost*. En este momento, la prevención del cambio climático es el único método que sin duda minimizará esta pérdida.

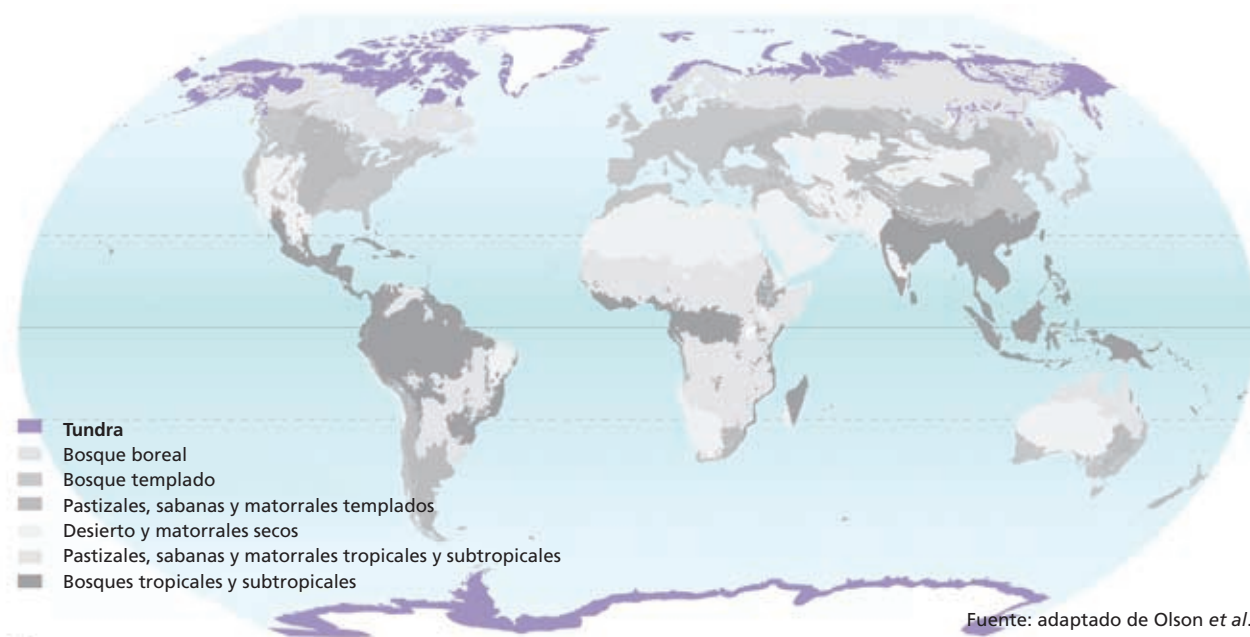
Los ecosistemas de tundra se encuentran en ambientes árticos y montañosos, en particular en el norte de Canadá, Escandinavia, Rusia, Groenlandia e Islandia. Las temperaturas son bajas o muy bajas la mayor parte del año, con prolongados periodos de cobertura de nieve y una breve temporada de cultivo. La capa de suelo activa, cercana a la superficie, tiende a anegarse en el verano y congelarse en el invierno. La diversidad vegetal y animal es reducida. El medio ambiente selecciona plantas resistentes a las heladas, de crecimiento lento y poca biomasa superficial. Las tasas de descomposición son bajas y en el suelo se acumulan grandes cantidades de materia vegetal muerta (aproximadamente 218 t C por ha, Amundson, 2001). La lenta tasa de descomposición significa que el reciclaje de nutrientes también es lento, lo que limita más el crecimiento de las plantas y hace que la mayor parte de su biomasa se encuentre bajo la superficie (De Deyn *et al.*, 2008). Se calcula que la biomasa vegetal total es de 40 t C por ha (Shaver *et al.*, 1992).

Bajo la capa de suelo activa hay una perennemente congelada, conocida como *permafrost*. Aunque es difícil calcularlo, se piensa que

la cantidad de carbono almacenado en el *permafrost* de todo el mundo es de alrededor de 1600 Gt, lo que equivale al doble del reservorio atmosférico (Schuur *et al.*, 2008).

EFFECTOS ANTROPOGÉNICOS E IMPLICACIONES PARA LA GESTIÓN DEL CARBONO

En la actualidad, el ser humano usa poco los ecosistemas de la tundra y son escasas las posibilidades de que se produzca ahí una mayor captura de carbono, en las condiciones actuales. Sin embargo, se espera que, incluso, un nivel relativamente pequeño de calentamiento global tenga importantes repercusiones en estos sistemas. Schuur *et al.* (2008) calculan que el derretimiento del *permafrost*, como consecuencia del cambio climático y la descomposición posterior del carbono en el suelo, podrían liberar 40 Gt CO₂ a la atmósfera en cuatro décadas, y 100 Gt CO₂ hacia finales del siglo, suficiente para generar un aumento de 47 ppm en la concentración atmosférica de CO₂.



Fuente: adaptado de Olson *et al.*, 2001.

BOSQUE BOREAL

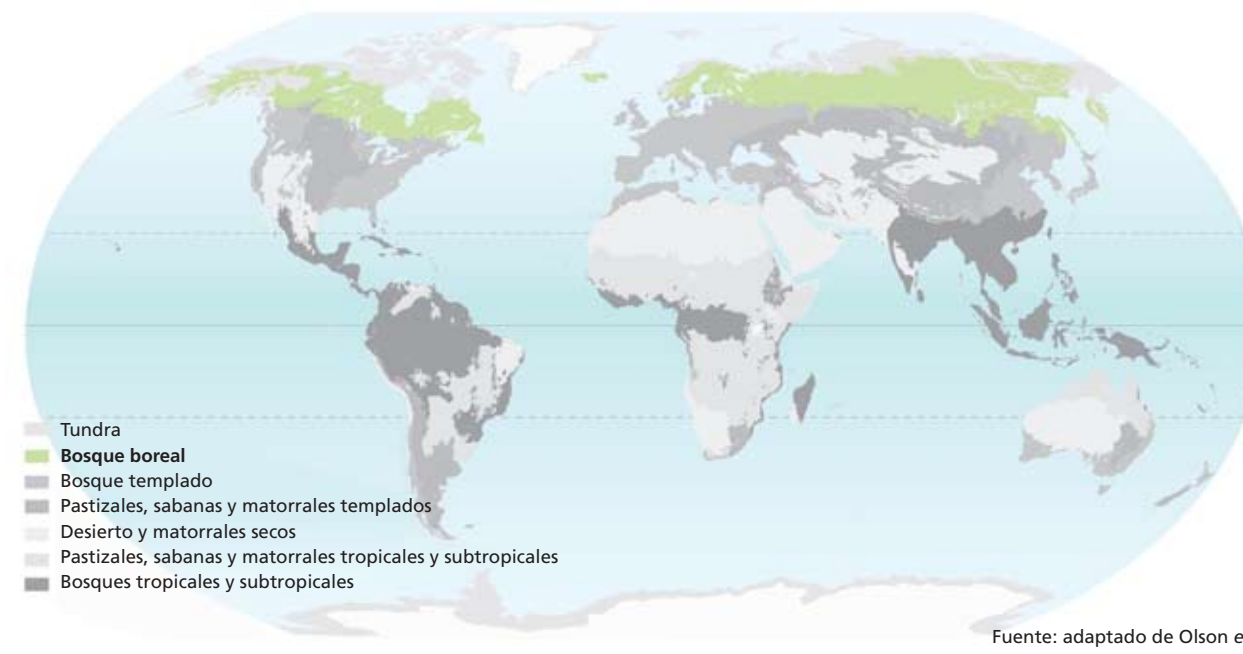
El bioma del bosque boreal contiene la segunda reserva de carbono más abundante, en su mayoría almacenado en el suelo y la hojarasca. La desecación de las turbas de los bosques boreales, las prácticas forestales inapropiadas y la gestión deficiente de los incendios son todos factores que pueden ocasionar pérdidas considerables del carbono almacenado en este ecosistema.

Los bosques boreales ocupan grandes extensiones del hemisferio norte y se encuentran sobre todo en Canadá, Rusia, Alaska y Escandinavia. La biodiversidad de estos bosques suele ser reducida. La biomasa vegetal es mucho mayor que en la tundra, con, aproximadamente, de 60 a 100 toneladas de carbono por hectárea, de las cuales alrededor de 80 por ciento se encuentra en la biomasa superficial (Mahli *et al.*, 1999; Luyssaert *et al.*, 2007). Dadas las bajas temperaturas, la descomposición en los bosques boreales es baja. Como en el caso de la tundra, esto da origen a grandes acumulaciones de carbono en el reservorio del suelo (116-343 t C por ha, Mahli *et al.*, 1999; Amundson, 2001). Los incendios son comunes en los bosques boreales, lo que ocasiona que el fuego sea uno de los principales factores del balance del carbono: el sistema pierde carbono cuando es alta la frecuencia de incendios (Bond-Lamberty *et al.*, 2007). Existe el debate acerca de si los bosques boreales muy maduros, o antiguos, son ahora una fuente o un sumidero

de carbono, aunque estudios recientes indican que en realidad son sumideros (Luyssaert *et al.*, 2008). En términos generales, a causa de las bajas tasas de descomposición y las extensas turbas en las que pueden crecer, se considera que los bosques boreales son importantes sumideros de carbono.

EFFECTOS ANTROPOGÉNICOS E IMPLICACIONES PARA LA GESTIÓN DEL CARBONO

El aumento de la presión generada por las actividades humanas en estos bosques, como la tala y la minería, y la desecación de las turbas donde crecen, provocan la emisión de carbono a la atmósfera y reducen de manera considerable su capacidad de almacenamiento de dicho gas. Por consiguiente, protegerlos de la tala y aplicar prácticas forestales óptimas pueden reducir sus emisiones de carbono, conservar sus reservas y mantener su nivel de absorción.



Fuente: adaptado de Olson *et al.*, 2001.

BOSQUE TEMPLADO

Los bosques templados son sumideros de carbono activos y la deforestación en la zona templada se ha detenido en grado importante. Dependiendo de la demanda de suelo o agua, la reforestación permitiría el secuestro de carbono y ofrecería otros beneficios, incluidas una mayor diversidad y más oportunidades de recreación.

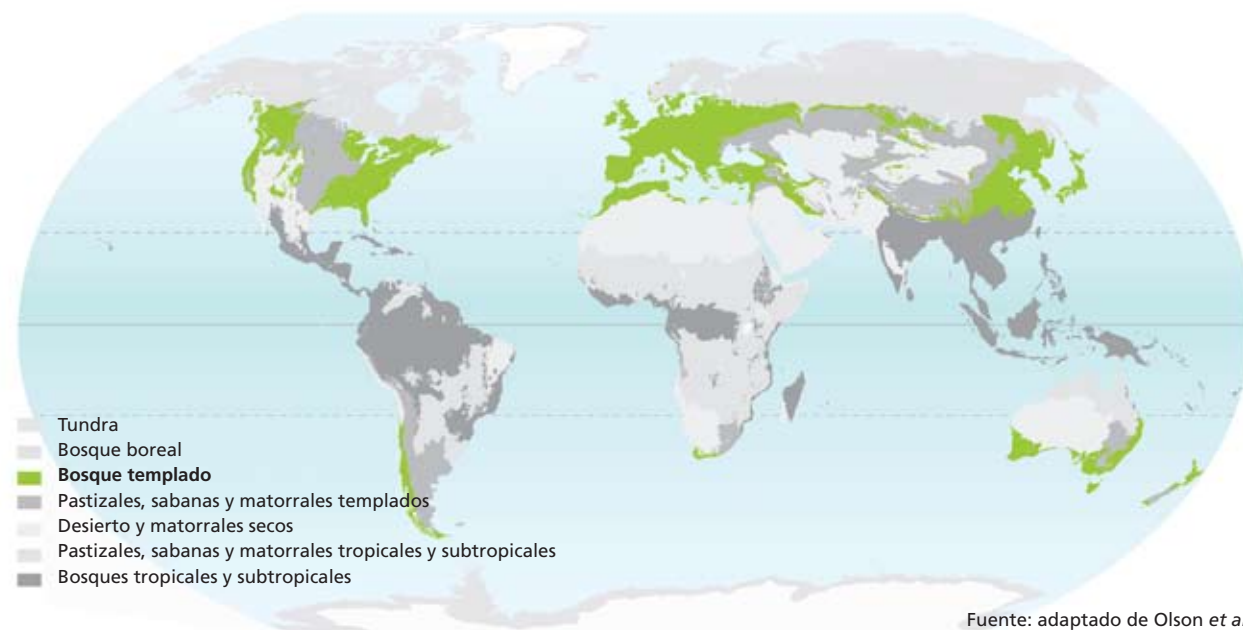
Los bosques templados se encuentran en climas con cuatro estaciones diferenciadas; tienen un invierno bien definido y precipitación regular. Ocupan grandes extensiones de Asia, Europa y América del Norte, sobre todo en las naciones desarrolladas. Hay muchos tipos diferentes de bosques templados, algunos dominados por árboles frondosos y otros por especies de coníferas. Por lo general, tienen una diversidad animal y vegetal relativamente elevada. Como los suelos que generan suelen ser muy fértiles, gran parte del área alguna vez ocupada por bosques templados se ha convertido a tierras de cultivo y pastoreo, es decir, ahora se destina a la producción de alimentos.

El crecimiento de las plantas, la descomposición y el ciclo del carbono son rápidos en los bosques templados, en cuyo suelo se acumula menos carbono que en los bosques boreales o la tundra. Se calcula que la reserva total de carbono de estos bosques oscila entre 150 y 320 toneladas por hectárea, con 60 por ciento en la biomasa vegetal —sobre

todo en forma de órganos leñosos superficiales y sistemas de raíces profundas y gruesas—, y el resto en el suelo (Amundson, 2001).

EFFECTOS ANTROPOGÉNICOS E IMPLICACIONES PARA LA GESTIÓN DEL CARBONO

La extensión de los bosques templados, sobre todo en Europa y en América del Norte, ha crecido por varias décadas. En muchas áreas, las actuales prácticas de gestión, como ciclos de tala relativamente prolongados y regímenes de quema apropiados, han ampliado la capacidad de almacenamiento de carbono. En consecuencia, hoy se considera que los bosques templados son, en general, sumideros de carbono. En Europa, se calcula que los bosques absorben de 7 a 12 por ciento de las emisiones europeas de carbono (Goodale *et al.*, 2002; Janssens *et al.*, 2003). Una mayor reforestación y mejoras en la gestión podrían incrementar el secuestro de carbono a corto plazo (Jandl *et al.*, 2007).



Fuente: adaptado de Olson *et al.*, 2001.

PASTIZALES TEMPLADOS

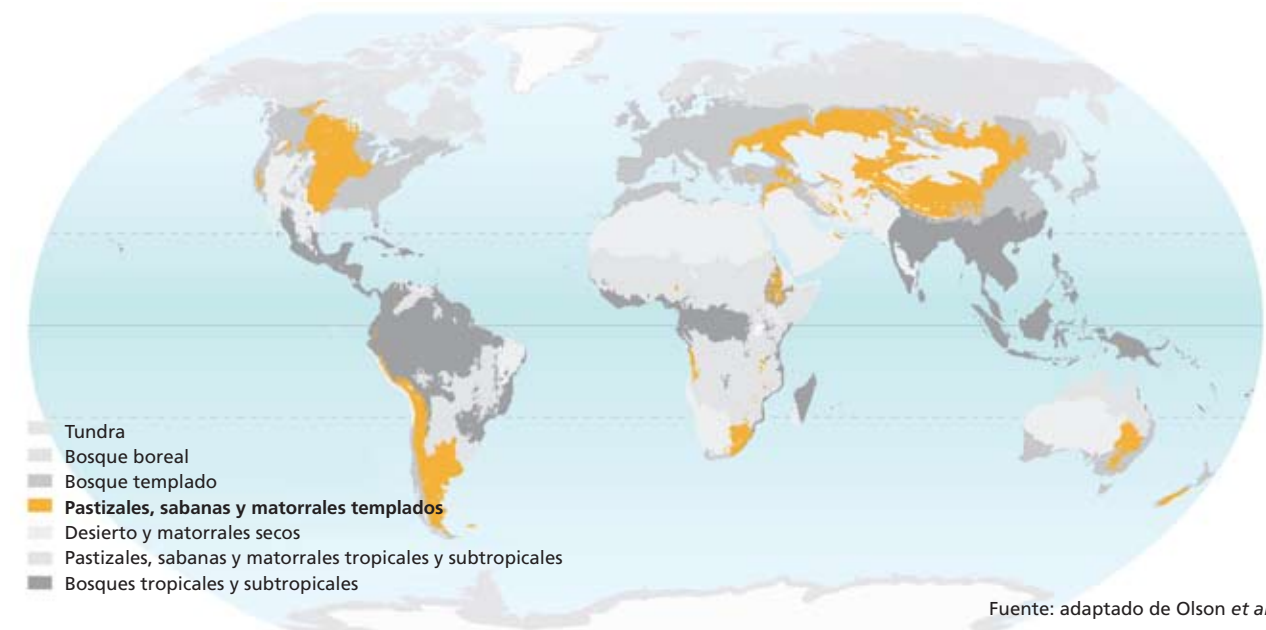
Gran parte del área original que ocupaba el pastizal templado se ha clareado para fines agrícolas. Donde queda vegetación natural, minimizar las perturbaciones ocasionadas por el ser humano puede evitar una mayor pérdida de carbono.

Los pastizales, presentes en gran parte del mundo, funcionan como un ecosistema de sucesión temprana en regiones forestadas. También, constituyen la vegetación original en climas con niveles de precipitación insuficientes para sustentar árboles, pero más altos que en los desiertos (Woodward *et al.*, 2004). Hay extensas áreas de pastizales templados naturales en América del Sur, en Estados Unidos y en la región central de Asia. El crecimiento de las plantas en estas áreas está limitado por la disponibilidad de agua y nutrientes, y gran parte de la biomasa de las plantas se encuentra bajo la superficie, donde producen raíces de descomposición lenta. Los animales de pastoreo normalmente desempeñan un importante papel en el mantenimiento de los pastizales, porque aceleran el ciclo del carbono al consumir grandes cantidades de biomasa de hojas, de la que devuelven una parte al suelo en forma de estiércol. Ésta es una forma de carbono orgánico más sencilla de descomponer que los detritos de hojas y raíces de los pastos. En muchas áreas esa función la tiene ahora el ganado.

En general, los pastizales templados tienen bajos niveles de biomasa vegetal en comparación con los ecosistemas de bosques o matorrales (por ejemplo, 0.68 y 7.3 t C por ha, respectivamente, en la estepa templada de China, Fan *et al.*, 2008). No obstante, sus reservas de carbono orgánico en el suelo tienden a ser mayores que las de los bosques templados (133 t C por ha, Amundson, 2001).

EFFECTOS ANTROPOGÉNICOS E IMPLICACIONES PARA LA GESTIÓN DEL CARBONO

Aunque su productividad es apenas intermedia, algunos pastizales templados son adecuados para la producción agrícola y pueden formar excelentes suelos para cultivo. En gran parte de su distribución natural —por ejemplo, las praderas estadounidenses—, los pastizales han sido clareados para dar paso a la agricultura intensiva.



Fuente: adaptado de Olson *et al.*, 2001.

DESIERTO Y MATORRALES SECOS

La gran superficie de tierras áridas le brinda al secuestro de carbono, en esas tierras, importancia global, a pesar de su densidad de carbono relativamente baja. El hecho de que muchos suelos áridos se hayan degradado significa que, lejos de estar saturados de carbono, pueden tener un alto potencial para su secuestro.

Los desiertos y los matorrales secos ocupan regiones de precipitación muy baja o estacional, y se encuentran en numerosas regiones, entre ellas, muchas partes de África, el sur de Estados Unidos y México, partes de Asia, y en grandes extensiones de Australia. La vegetación, de crecimiento lento, consiste sobre todo en matorrales leñosos y plantas de poca altura, y está muy adaptada a minimizar la pérdida de agua. Como la diversidad vegetal, la diversidad animal suele ser reducida.

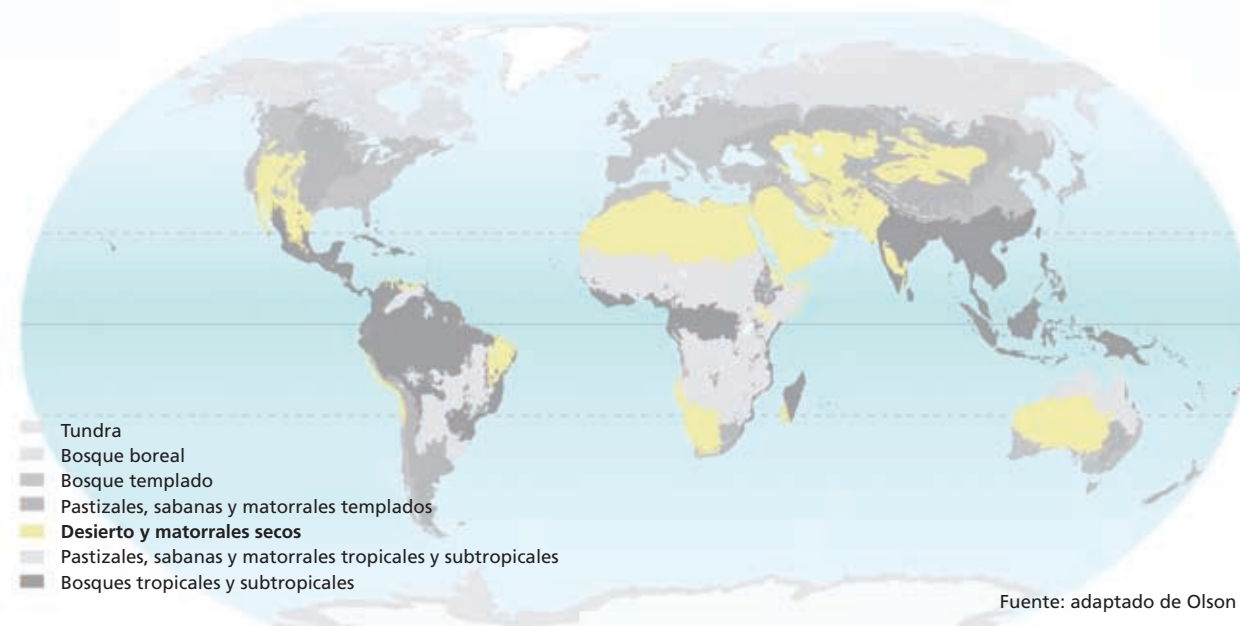
La falta de humedad determina la manera en que estos ecosistemas procesan el carbono. Las plantas crecen muy esporádicamente y dedican buena cantidad de su energía a protegerse de la pérdida de agua y de los herbívoros, formando tejidos duros y resistentes a la descomposición. La falta de agua también genera tasas de descomposición lentas, lo que provoca la acumulación en el suelo de materia vegetal muerta rica en carbono. Amundson (2001) calcula que el contenido de carbono de los suelos desérticos va de 14 a 100 toneladas por hectárea, mientras que los cálculos para los matorrales secos llegan a 270 toneladas por hectárea (Grace, 2004). El carbono acumulado en la vegetación es

considerablemente menor, con cantidades típicas de alrededor de 2 a 30 toneladas de carbono por hectárea, en total.

Algunos estudios recientes indican que la absorción de carbono en los desiertos es mucho mayor de lo que antes se pensaba y que contribuye de manera importante al sumidero de carbono terrestre (Wohlfahrt *et al.*, 2008). Sin embargo, persisten dudas considerables y es necesaria mayor investigación para verificar estos resultados, por ejemplo, cuantificando los reservorios de carbono superficiales y subterráneos en el transcurso del tiempo (Schlesinger *et al.* 2009).

EFFECTOS ANTROPOGÉNICOS E IMPLICACIONES PARA LA GESTIÓN DEL CARBONO

Debido a que estos ecosistemas suelen ser pobres en nutrientes, tienden a ser tierras agrícolas de mala calidad, por lo que su producción de alimentos se destina a la subsistencia. Cuando el suelo se degrada, a causa de los usos inadecuados, pierde carbono.



Fuente: adaptado de Olson *et al.*, 2001.

SABANAS Y PASTIZALES TROPICALES

Las sabanas cubren grandes extensiones de África y de América del Sur, y pueden acumular cantidades considerables de carbono, en especial en su suelo. Actividades como el cultivo, el pastoreo intensivo y la mayor frecuencia o intensidad de los incendios pueden reducir la cantidad de carbono almacenado en estos sistemas.

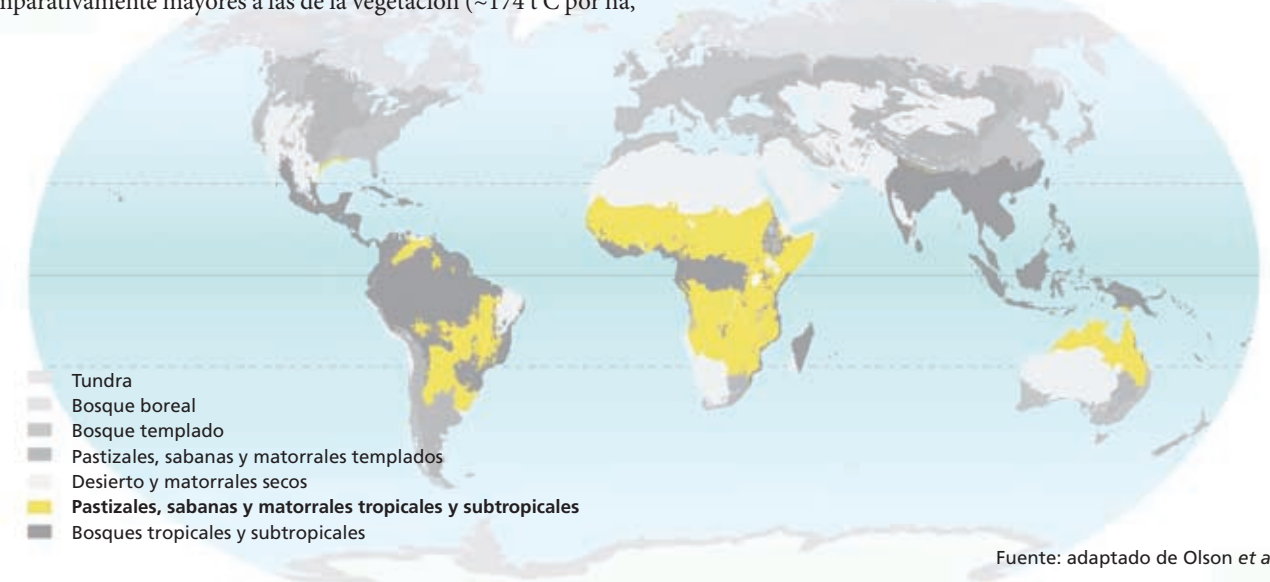
Las sabanas son un importante componente de la vegetación de la Tierra y se extienden en grandes áreas del África Subsahariana y de América del Sur. El bioma de la sabana se caracteriza por el dominio combinado de árboles y pastos, pero va desde pastizales donde prácticamente no hay árboles hasta ecosistemas boscosos donde predomina la vegetación arbórea. En su mayoría, las áreas de sabana son ecosistemas naturales; sin embargo, también se pueden formar a raíz de la degradación de bosques tropicales, ocasionada por la quema, el pastoreo y la deforestación. En África, las sabanas están habitadas por una carismática fauna de grandes mamíferos y ofrecen importantes oportunidades para el ecoturismo.

La cantidad de carbono acumulada en la superficie depende de la cobertura arbórea: puede ir de menos de 2 toneladas por hectárea, en el caso de los pastizales tropicales, hasta más de 30 toneladas por hectárea en las sabanas boscosas. Según los cálculos, las reservas de carbono en las raíces tienden a ser un poco mayores: de 7 a 54 toneladas por hectárea. Las reservas de carbono en el suelo son comparativamente mayores a las de la vegetación (~174 t C por ha,

Grace *et al.*, 2006). De manera natural, las sabanas y los pastizales tropicales son presa de incendios, que constituyen un importante componente en el funcionamiento de estos ecosistemas. Los incendios en las sabanas pueden emitir enormes cantidades de carbono a la atmósfera (según los cálculos, 0.5 a 4.2 Gt C al año en todo el mundo). No obstante, la mayor parte del carbono perdido se recupera durante el periodo siguiente, cuando vuelven a crecer las plantas, a menos que el área se convierta al pastoreo (Grace *et al.*, 2006). En general, se considera que estos ecosistemas actúan como sumideros de carbono, pues absorben alrededor de 0.5 Gt C al año (Scurlock & Hall, 1998).

EFFECTOS ANTROPOGÉNICOS E IMPLICACIONES PARA LA GESTIÓN DEL CARBONO

La presión generada por las actividades humanas sobre estos ecosistemas sigue aumentando, por lo que se calcula que al año se pierde más de uno por ciento de las sabanas en el mundo a causa de los incendios antropogénicos, la cría de ganado y las actividades agrícolas.



Fuente: adaptado de Olson *et al.*, 2001.

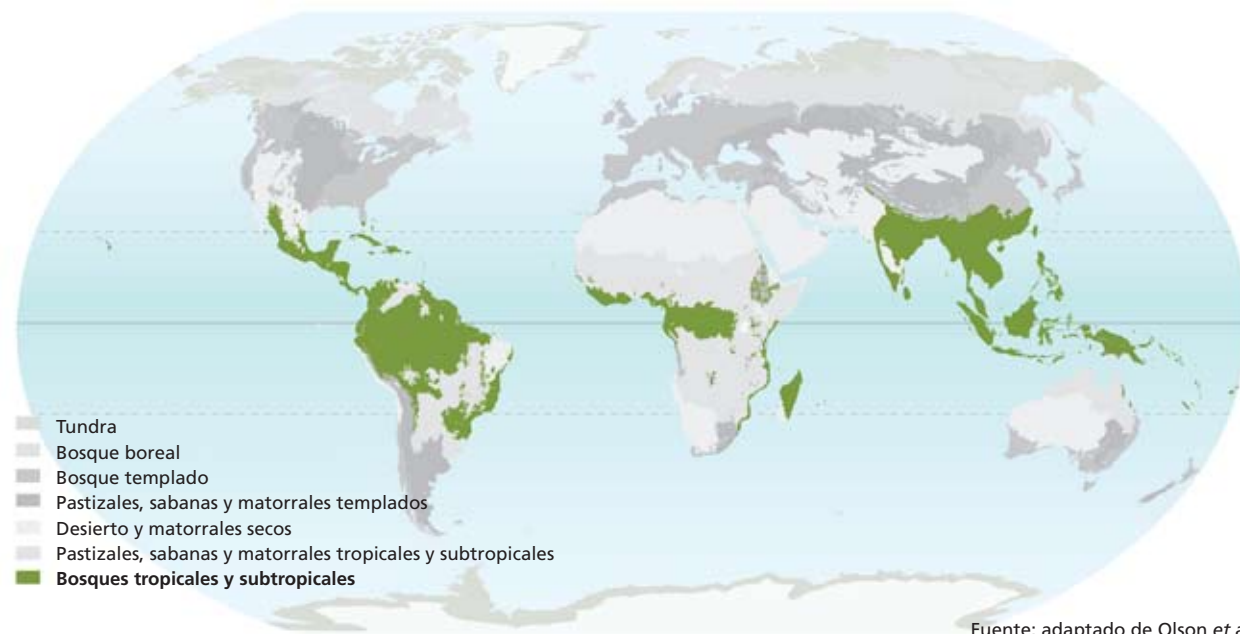
BOSQUES TROPICALES

Los bosques tropicales contienen la mayor reserva terrestre de carbono y son sumideros activos. La reducción de emisiones originadas por su deforestación y degradación es crucial para enfrentar al peligroso cambio climático. Además, combatir la tala ilegal o mal gestionada será una medida importante para reducir las emisiones de las actividades forestales.

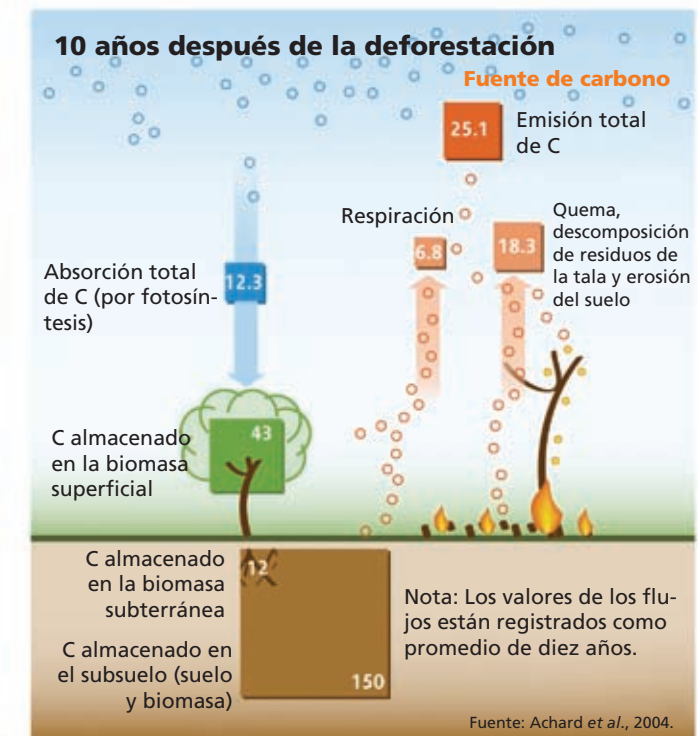
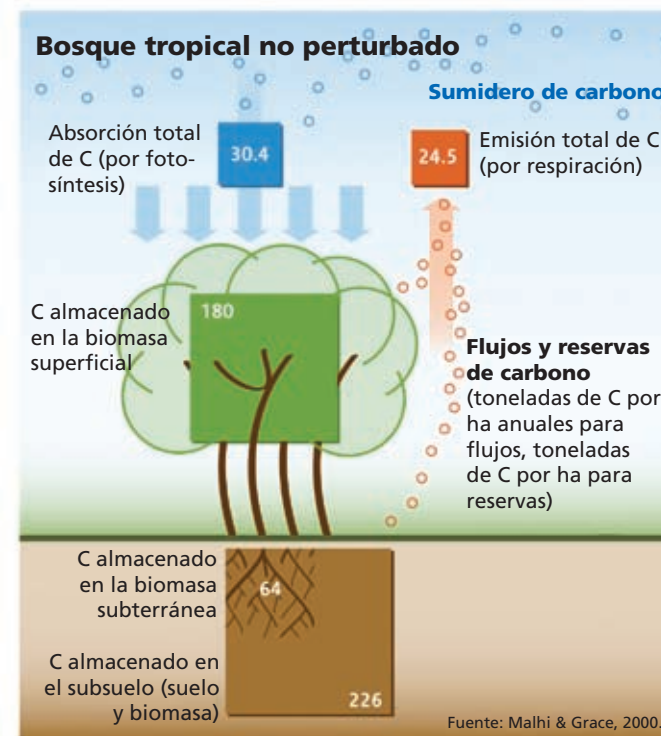
Los bosques tropicales ocupan grandes extensiones de la región centro y norte de América del Sur, el oeste de África, el sureste de Asia y el noreste de Australia. En su mayoría, los bosques tropicales son húmedos, ubicados en zonas con una precipitación pluvial que suele rebasar los 2000 mm anuales y una distribución relativamente uniforme. Estos bosques tienen una enorme diversidad de plantas, mamíferos, insectos y aves. De hecho, se considera que albergan la mayor diversidad de todos los biomas del planeta.

El clima cálido y lluvioso de los bosques tropicales húmedos tiene por efecto el rápido crecimiento de las plantas y la mayor parte del carbono se encuentra en la vegetación, con estimados de biomasa de

170-250 t C por ha (Malhi *et al.*, 2006; Chave *et al.*, 2008; Lewis *et al.*, 2009). Las reservas de carbono de los bosques tropicales húmedos varían considerablemente dependiendo de la abundancia de especies grandes con follaje denso, que acumulan la mayor parte del carbono (Baker *et al.*, 2004). En promedio, se calcula que almacenan unas 160 toneladas por hectárea en la vegetación superficial y 40 toneladas por hectárea en las raíces. Amundson (2001) calcula que las reservas de carbono en el suelo representan de 90 a 200 toneladas por hectárea, aproximadamente, y, por ende, son algo inferiores a las reservas de la biomasa.



Fuente: adaptado de Olson *et al.*, 2001.



Globalmente, los bosques tropicales son considerados sumideros de carbono. Investigaciones recientes indican que, en el mundo, la absorción anual es de alrededor de 1.3 Gt. Se calcula que los bosques tropicales de América Central y del Sur absorben aproximadamente 0.6 Gt C, los de África poco más de 0.4 Gt y los de Asia cerca de 0.25 Gt (Lewis *et al.*, 2009). Para poner esta cifra en contexto, la absorción del carbono en los bosques tropicales equivale a, aproximadamente, 15 por ciento de las emisiones antropogénicas totales de carbono en el mundo. Por tanto, los bosques tropicales contribuyen de manera importante a mitigar el cambio climático.

USO HUMANO Y CONVERSIÓN DE LOS BOSQUES TROPICALES

Los suelos de los bosques tropicales se están convirtiendo a usos industriales y agrícolas (producción de alimentos y biocombustibles) a una gran velocidad. Las causas de la deforestación tropical son complejas y van desde problemas de fondo relativos a presiones internacionales hasta la mala gestión pública de las necesidades de recursos locales (Geist & Lambin, 2001). En este momento, se estima que las tasas de deforestación oscilan entre 6.5 y 14.8 millones de

hectáreas anuales, y que las actividades de deforestación emiten a la atmósfera de 0.8 a 2.2 Gt C al año (Houghton, 2005a). Esto no sólo reduce las reservas de carbono en la vegetación, sino que también puede mermar considerablemente las reservas en el suelo.

Además de la deforestación, los bosques tropicales también son utilizados para extraer madera y otros productos forestales. Esto ocasiona la degradación del bosque y se calcula que contribuye a la emisión adicional a la atmósfera de 0.5 Gt de carbono al año (Achard *et al.* 2004).

En la tala de bosques tropicales húmedos, por lo general sólo se cortan de uno a veinte árboles por hectárea. Las técnicas convencionales de tala dañan o matan una parte sustancial de la vegetación restante durante las operaciones de explotación, lo que provoca grandes pérdidas de carbono. Las técnicas de tala de impacto reducido pueden disminuir las pérdidas de carbono en alrededor de 30 por ciento durante las actividades forestales, en comparación con las técnicas convencionales (Pinard & Cropper, 2000).

TURBA

Los suelos de turba almacenan una gran cantidad de carbono, pero existe el grave riesgo de que gran parte de él se pierda porque estos ecosistemas, en todo el mundo, se están convirtiendo a la agricultura, a las plantaciones y a la bioenergía. La conservación y rehabilitación de las turbas tropicales debe considerarse una prioridad mundial.

Aunque no se trata de un verdadero bioma, las turbas representan un caso especial en la gestión del ciclo del carbono en el mundo. Éstas se relacionan con una serie de ambientes anegados donde la descomposición de la materia vegetal muerta y del carbono en el suelo es sumamente lenta, lo que da como resultado la fosilización de hojarasca y un suelo con contenido de carbono orgánico superior a 30 por ciento. Aunque se pueden encontrar algunos suelos de turba en ecosistemas productivos, como pantanos de papiros, juncales y manglares, suelen considerarse

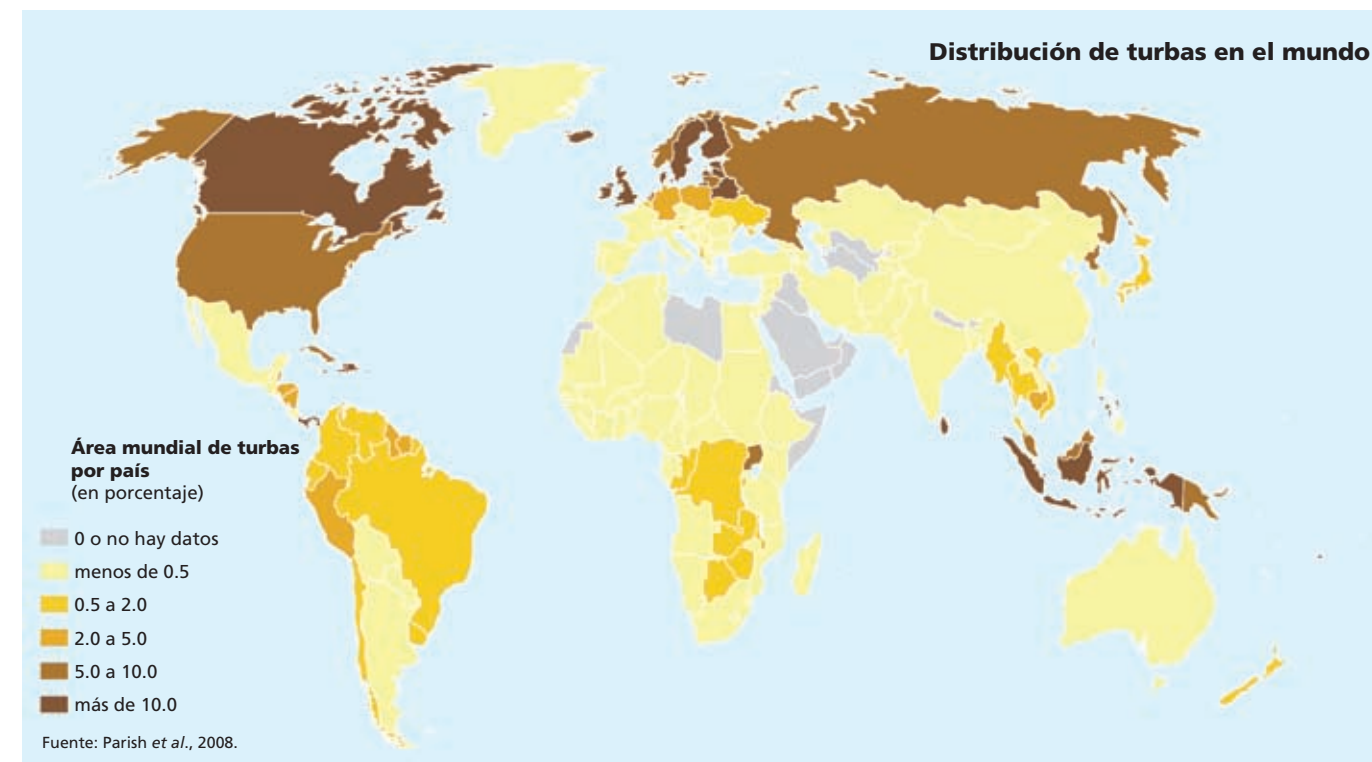
entornos improductivos, donde la vegetación crece con mucha lentitud. Su capacidad de almacenamiento es enorme; se calcula que hay ~550 Gt de carbono almacenadas en suelos de turba en todo el mundo (Sabine *et al.*, 2004), con un promedio mundial de 1450 t C por ha (Parish *et al.*, 2008). Estas áreas están distribuidas por todo el planeta, pero abarcan una proporción diminuta del área de suelo, lo que hace de las turbas uno de las reservas de carbono más efectivas de todos los ecosistemas en lo que a espacio se refiere.



Se pierden grandes cantidades de carbono al desecar las turbas y, a menos que se adopten medidas urgentes, esta pérdida aumentará pues las áreas desecadas crecen a un ritmo constante. Al menos la mitad de estas pérdidas están ocurriendo en las turbas tropicales. En estas áreas, concentradas en Malasia e Indonesia, se están desecando grandes extensiones de bosque tropical para la obtención de aceite de palma y madera para pulpa (Verwer *et al.*, 2008). La desecación de los suelos de turba produce un ambiente aeróbico, en el que los organismos del suelo respiran el carbono presente. La pérdida de carbono se ve agravada por el aumento de la probabilidad de incendios en las turbas desecadas, pues éstas actúan como fuente de combustible para los incendios subterráneos.

No se tiene certeza acerca del nivel de pérdidas de carbono en las turbas desecadas (Parish *et al.*, 2008; Verwer *et al.*, 2008), pero lo más probable es que ya sean importantes (de 0.5 a 0.8 Gt C al año) y que representen una proporción considerable

de todas las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero. A causa de estas pérdidas, los cultivos para biocombustibles en suelos de turba desecados tienen un efecto perjudicial en el balance mundial de carbono. Se calcula, por ejemplo, que la combustión del aceite de palma producido en una turba desecada genera, por unidad de energía producida, de tres a nueve veces la cantidad de CO₂ producido al quemar carbón, lo que equivale a una deuda de carbono para cuyo pago se requieren 420 años de producción de biocombustibles (Fargione *et al.*, 2008). Esta cifra pone de relieve la falsa economía del carbono que representan los cultivos para biocombustibles en turbas desecadas, así como la necesidad de conservarlas intactas y su potencial para reducir emisiones si se les rehumedece. Al rehumedecerla, una turba vuelve a su estado de anegación, lo que restablece las condiciones anaeróbicas en las que se detiene la descomposición de la materia vegetal muerta y, en consecuencia, se reducen mucho las emisiones de CO₂ y el riesgo de incendios.



OCÉANOS Y COSTAS

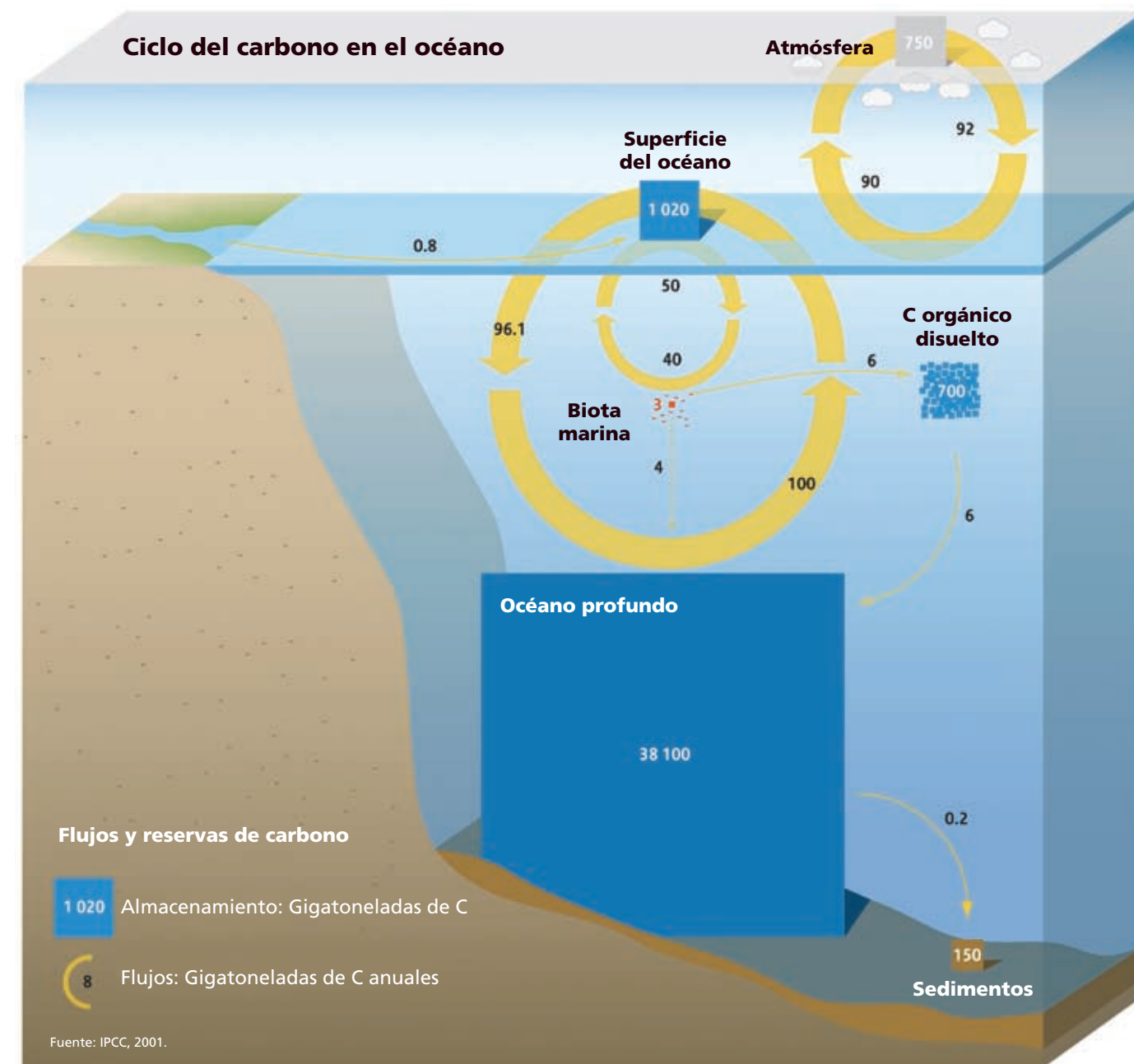
Sin la contribución de los ecosistemas oceánicos y costeros al secuestro biológico de carbono, hoy la concentración de CO₂ en la atmósfera sería mucho mayor. Pero esta capacidad de absorción de los océanos y costas es finito y vulnerable. La reducción al mínimo de las presiones, la rehabilitación y el uso sostenible son opciones de gestión que pueden ayudar a que estos ecosistemas mantengan su importante función en la gestión del carbono.

Los océanos desempeñan un papel de enorme importancia tanto en la etapa orgánica como en la inorgánica del ciclo del carbono. Contienen disuelto cincuenta veces el carbono inorgánico que se encuentra en la atmósfera, en forma de una compleja mezcla de dióxido de carbono, ácido carbónico y carbonatos disueltos (Raven & Falkowski, 1999). El dióxido de carbono es considerablemente más soluble en agua fría que en agua tibia y la relación entre la concentración de CO₂ en la atmósfera y la de carbono inorgánico disuelto en los océanos depende mucho, por lo tanto, de la temperatura del agua y la circulación oceánica. Normalmente, las aguas superficiales frías en latitudes elevadas absorben grandes cantidades de dióxido de carbono. Conforme esto ocurre, se vuelven más densas y descienden al fondo del mar, llevando consigo carbono inorgánico disuelto y creando la llamada bomba de solubilidad. A medida que la concentración (o presión parcial) de dióxido de carbono aumenta en la atmósfera, el océano lo absorbe más. Por ello, se piensa que los océanos han absorbido alrededor de 30 por ciento de las emisiones de dióxido de carbono antropogénicas desde la industrialización (Lee *et al.*, 2003). El océano es, entonces, el segundo mayor sumidero de dióxido de carbono antropogénico después de la atmósfera (Iglesias-Rodríguez *et al.*, 2008). Un impacto de la absorción adicional de carbono ha sido la acidificación, reducida pero medible, del océano en este periodo (Orr *et al.*, 2005).

El carbono inorgánico disuelto se convierte en carbono orgánico disuelto o en partículas en el océano abierto, mediante la fotosíntesis del fitoplancton. En total, se calcula que en los océanos se produce poco menos de la mitad de la absorción de carbono biológico de todo el mundo (Field *et al.*, 1998). La mayor parte de este carbono fijo es reciclado dentro de la zona fótica (la profundidad de la columna de agua expuesta a luz solar suficiente

para que ocurra la fotosíntesis), lo que sirve de sustento a los microorganismos que conforman la base de la red alimentaria marina. En gran parte del océano, la actividad fotosintética está limitada por la disponibilidad de nutrientes. Una excepción notable son las zonas de corrientes ascendentes, donde las aguas ricas en nutrientes llegan a la superficie, lo que produce un abundante crecimiento de plancton. Ahí el fitoplancton puede formar "floraciones" de gran escala que cubren cientos de miles de kilómetros cuadrados de la superficie del mar e influyen en importantes procesos ecológicos y del ciclo del carbono. Cuando los restos de plancton muerto se hunden al fondo del mar, la materia orgánica de su biomasa se entierra en forma de sedimentos excepcionalmente ricos en carbono orgánico —a esta transferencia de carbono de las aguas superficiales (y, en consecuencia, indirectamente de la atmósfera) al lecho oceánico profundo y, a la larga, a la corteza terrestre mediante subducción, se le conoce como bomba biológica. Sólo de 0.03 a 0.8 por ciento de la materia orgánica del mar forma sedimentos (Yin *et al.*, 2006), y para que éstos se mantengan siempre secuestrados, es necesario que no sean reciclados para que no regresen al sistema de intercambio trófico.

Las zonas costeras (aguas litorales de hasta 200 metros de profundidad, que incluyen ecosistemas coralinos y de pasto marino) también cumplen una importante función en el ciclo del carbono oceánico. Varios cálculos indican que la mayor parte de la mineralización y el entierro del carbono orgánico, así como la producción y la acumulación de carbonatos, ocurre en esta región, pese al hecho de que abarca menos de 10 por ciento del área oceánica total (Bouillon *et al.*, 2008). Se estima que el entierro de carbono asciende ahí a poco más de 0.2 Gt C al año (Duarte, 2002).





RESUMEN. ECOSISTEMAS NATURALES

Los ecosistemas terrestres constituyen una vasta reserva de más de 2000 Gt C y actúan como un sumidero neto de carbono de alrededor de 1.5 Gt C al año, de la cual, los bosques tropicales representan una gran proporción (Luyssaert *et al.*, 2007; IPCC, 2007b). En estos niveles, el secuestro equivaldría a una reducción en la atmósfera, para 2100, de 40-70 ppm de CO₂ e procedente de emisiones antropogénicas (Canadell & Raupach, 2008).

Además de conservar estos sitios de almacenamiento y sumideros, hay un gran potencial para reducir las futuras emisiones de gases de efecto invernadero mediante la rehabilitación de entornos degradados, por ejemplo, rehumedeciendo las turbas, reforestando las áreas deforestadas y reduciendo las tasas de deforestación y pérdida de turbas.

Si no se adoptan políticas eficaces y medidas para desacelerar la deforestación, es probable que la tala de bosques tropicales liberen de 87 a 130 Gt C adicionales para 2100, lo que equivale a las emisiones de carbono de más de una década de quema de combustibles

fósiles en el mundo, al ritmo actual (Houghton, 2005b; Gullison *et al.*, 2007). Desde luego, si se eliminara la deforestación, se evitarían estas emisiones. Sin embargo, aun partiendo de suposiciones más conservadoras para la reducción de la deforestación (que las tasas de deforestación observadas en los años noventa decrezcan de manera lineal 50 por ciento de 2010 a 2050, y que se detenga por completo cuando en cada país quede 50 por ciento de áreas originalmente forestadas en 2000), se podría lograr una reducción de emisiones acumulada de 50 Gt C para 2100 (Gullison *et al.*, 2007).

Las turbas son otro ecosistema que ofrece un gran potencial para reducir emisiones en el futuro. Se estima que 65 millones de hectáreas de los recursos mundiales de turba están degradados, sobre todo a causa de la desecación. Se piensa que la oxidación de la turba de esta área origina alrededor de 0.8 Gt de emisiones de carbono al año, lo que equivale a 20 por ciento del total de emisiones netas de gases de efecto invernadero de 2003, procedentes de las Partes incluidas en el Anexo 1 de la CMNUCC. Los incendios en turbas en el sureste de Asia (principalmente en Indonesia) son causantes de la mitad de esas emisiones originadas en turberas en todo el mundo (Parish *et al.*, 2008).

Carbono en ecosistemas naturales

	Crecimiento de la vegetación	Descomposición de la vegetación	Fuente o sumidero de C	Reserva actual de C (t C/ha)	Lugar de mayor almacenamiento de C	Principal(es) amenaza(s) de potenciales emisiones de C
Tundra	Lento	Lento	Sumidero	Aprox. 258	Permafrost	Temperaturas al alza
Bosque boreal	Lento	Lento	Sumidero	Suelo: 116-343 Vegetación: 61-93	Suelo	Incendios, tala, minería
Bosque templado	Rápido	Rápido	Sumidero	156-320	Biomasa superficial y subterránea	Grandes pérdidas históricas, pero han disminuido mucho
Pastizales templados	Intermedio	Lento	Probablemente Sumidero	Suelo: 133; Vegetación: 8	Suelo	Grandes pérdidas históricas, pero han disminuido mucho
Desierto y matorrales secos	Lento	Lento	Sumidero (pero incierto)	Suelo desértico: 14-102 Suelo árido: <266, Vegetación: 2-30	Suelo	Degradación del suelo
Sabanas y pastizales tropicales	Rápido	Rápido	Sumidero	Suelo: <174, Vegetación <88	Suelo	Incendio con conversión posterior a pastizal
Bosques tropicales	Rápido	Rápido	Sumidero	Suelo: 94-191; Vegetación: 170-250	Vegetación superficial	Deforestación y degradación de los bosques
Turbas	Lento	Lento	Sumidero	1450	Suelo	Desecación, conversión, incendios
Océanos y costas	En función del plancton: Rápido	Rápido	Sumidero	(Total) Superficie: 1020 Gt C, C orgánico disuelto: 700 Gt C; Océano profundo: 38100, Sedimentos: 150	Océano profundo	No hay emisiones, pero disminuye la capacidad de absorción

Los humedales costeros tienen el potencial de acumular carbono a gran velocidad durante largos periodos porque continuamente agregan sedimentos ricos en carbono orgánico, los que terminan enterrados. Chmura *et al.* (2003) calcularon que, en todo el mundo, los manglares acumulan alrededor de 0.038 Gt C al año, lo que indica, considerando el área de cobertura, que secuestran carbono a mayor velocidad que los bosques terrestres (Suratman, 2008). Sin embargo, se reconoce ampliamente que si persisten las pautas actuales de uso, explotación y efectos, los humedales costeros se volverán fuentes de carbono y dejarán de ser sumideros (Hoojier *et al.*, 2006; Jaenicke *et al.*, 2008; Cagampan & Waddington, 2008; Uryu *et al.*, 2008; Neely & Bunning, 2008; Parish *et al.*, 2008). Duarte *et al.* (2005), estiman que la pérdida extensa de hábitats de vegetación costeros ha reducido el entierro de carbono en el océano en alrededor de 0.03 Gt C al año.

Se han propuesto soluciones de ingeniería para aumentar el potencial de secuestro de los océanos. Algunas de ellas, como la

fertilización del océano con hierro, fósforo o nitratos, aumentan la absorción biológica de carbono. Otras, como la inyección de CO₂ en mares profundos, usan reservorios geofísicos. El fundamento de la ingeniería de los océanos, que tienen una capacidad calculada de varios miles de Gt C, es acelerar la transferencia de CO₂ de la atmósfera a la profundidad del océano, proceso que ocurre naturalmente a un ritmo aproximado de 2 Gt C al año (Huesemann, 2008). Algunos investigadores advierten que es poco probable que estas soluciones den buenos resultados a escala mundial, pues hay muchas dudas sobre sus posibles efectos ecológicos secundarios y al impacto directo que éstos podrían tener en la vida marina local. Hay experimentos en curso de fertilización a gran escala, pero es difícil determinar la cantidad de carbono que realmente se secuestra en el lecho oceánico. En vista de que se desconocen demasiadas variables y de las limitaciones actuales de los modelos, algunos instan a ser cautelosos con cualquier intervención en el océano basada en la ingeniería.



GESTIÓN DEL CARBONO EN ECOSISTEMAS DOMINADOS POR EL SER HUMANO

Una alta proporción de los ecosistemas naturales ha sido convertido para su uso por el ser humano, como las tierras agrícolas. Existen distintas estimaciones acerca de la extensión de tierra para ese fin. La Evaluación de Ecosistemas del Milenio determinó que 24 por ciento de la superficie terrestre estaba dentro de “sistemas cultivados” (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), pero Foley *et al.* (2005) señalaron que se trata de 40 por ciento de ocupación por tierras agrícolas y de pastoreo, un área similar a la cubierta por bosques. En las siguientes secciones abordaremos el potencial de gestionar el carbono en la agricultura de zonas templadas y tropicales, así como en las plantaciones forestales.

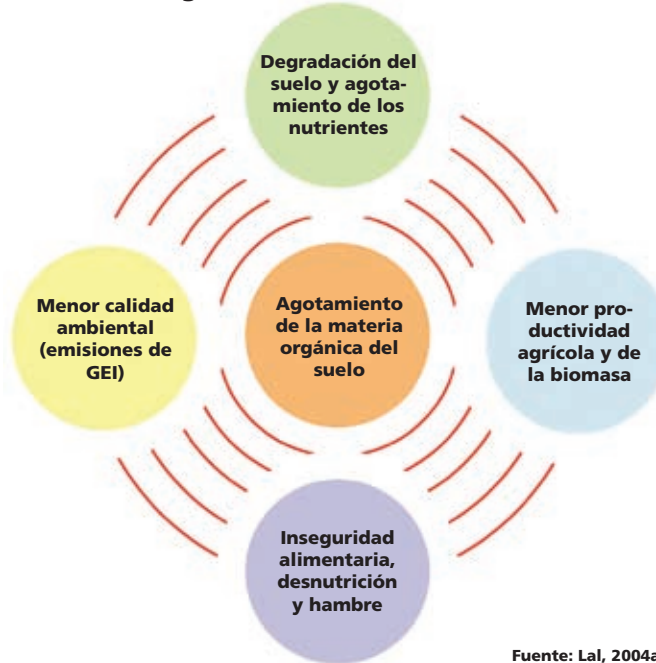


AGRICULTURA DE ZONAS TEMPLADAS

Tenemos un buen conocimiento de las mejores maneras de almacenar carbono en los sistemas agrícolas y ahora se pueden seguir prácticas para aumentar esa acumulación. A fin de acelerar el proceso, podrían considerarse incentivos para fomentar el secuestro de carbono en tierras agrícolas, pero deberán vigilarse con cuidado e incluyen un análisis de ciclo de vida cuando se evalúa el costo real en carbono de varias prácticas. A escala local, podría haber incentivos para las prácticas agrícolas que acumulan carbono, así como educación sobre las mejores estrategias para aumentar el almacenamiento de carbono.

Los sistemas agrícolas de las zonas templadas tienden a ocupar suelos fértiles que antes fueron pastizales o bosques templados. El clearo de tierras para destinarlas a cultivo o pastoreo ha mermado en alto grado la reserva de carbono en la superficie; en muchas ocasiones, las reservas en el suelo también están agotadas debido a que la labranza lo altera al abrirlo a organismos descomponedores, lo que genera condiciones aeróbicas que estimulan la respiración, con lo que se libera dióxido de carbono. Pese a todo, hay un gran

El círculo vicioso del agotamiento de la materia orgánica del suelo



Fuente: Lal, 2004a.

potencial en estos sistemas para un mayor almacenamiento. Por ejemplo, cálculos recientes indican que si se devolviera toda la paja a las tierras agrícolas, podría secuestrarse alrededor de 5 por ciento de las emisiones de dióxido de carbono ocasionadas por la quema de combustibles fósiles en China en los años noventa (Lu *et al.*, 2008).

Las pérdidas de carbono en los sistemas agrícolas se pueden reducir de muchas maneras, por ejemplo, con la labranza para la conservación, la rotación de cultivos, la adopción de sistemas apropiados de cultivo, la gestión integral de nutrientes usando composta y estiércol, el compostaje, la gestión integral de maleza y plagas, y un mejor pastoreo (Lal, 2008). La gestión óptima, es decir, aquella que permite conservar mejor el carbono, al tiempo que sustenta la producción de alimentos, dependerá de las características específicas del sistema agrícola de que se trate. Por consiguiente, lo mejor es aplicar la política de gestión de las tierras a escala local. Lo que queda claro es que un incremento en las reservas de carbono de los sistemas agrícolas representa una situación en la que todos salen ganando, porque los niveles altos de carbono orgánico en el suelo mejoran la eficiencia de uso de nutrientes y agua, reducen la pérdida de nutrientes y, posteriormente, aumentan la producción agrícola. Una mejor infiltración y retención de agua en suelos con un alto contenido de carbono orgánico también aumenta la infiltración de agua, reduce la escorrentía y la erosión, y ayuda evitar los daños de las sequías, con lo que contribuye a la sostenibilidad de la producción alimentaria.

Otra opción consiste en aumentar la producción alimentaria en algunas de las tierras agrícolas que ya existen, mediante



el uso muy selectivo de fertilizantes y plaguicidas, la llamada “agricultura de precisión”, mientras se deja que otras áreas recuperen su vegetación natural. El área para tierras de cultivo en el mundo desarrollado va en declive y esto puede continuar en el futuro (Balmford *et al.*, 2005), con lo que, potencialmente, se liberan áreas terrestres que podrían destinarse al secuestro de carbono. Evidencias recientes demuestran que ha habido ganancia de carbono en tierras agrícolas abandonadas tras la caída de la Unión Soviética (ganancias en el suelo de 0.47 t C por hectárea al año, Vuichard *et al.*, 2009). Esto también se aplica a tierras abandonadas en Europa y América del Norte, pues un sumidero de carbono alcanza su mayor fuerza en las etapas tempranas de la sucesión ecológica y el desarrollo forestal.

El biocarbón: ¿una panacea?

El biocarbón es una tecnología nueva y aún poco estudiada. Es probable que su eficacia como estrategia para el almacenamiento de carbono dependa fuertemente de factores económicos y ambientales. Las investigaciones aún están en una etapa preliminar y no se recomienda el uso del biocarbón a gran escala hasta que se despejen estas dudas.

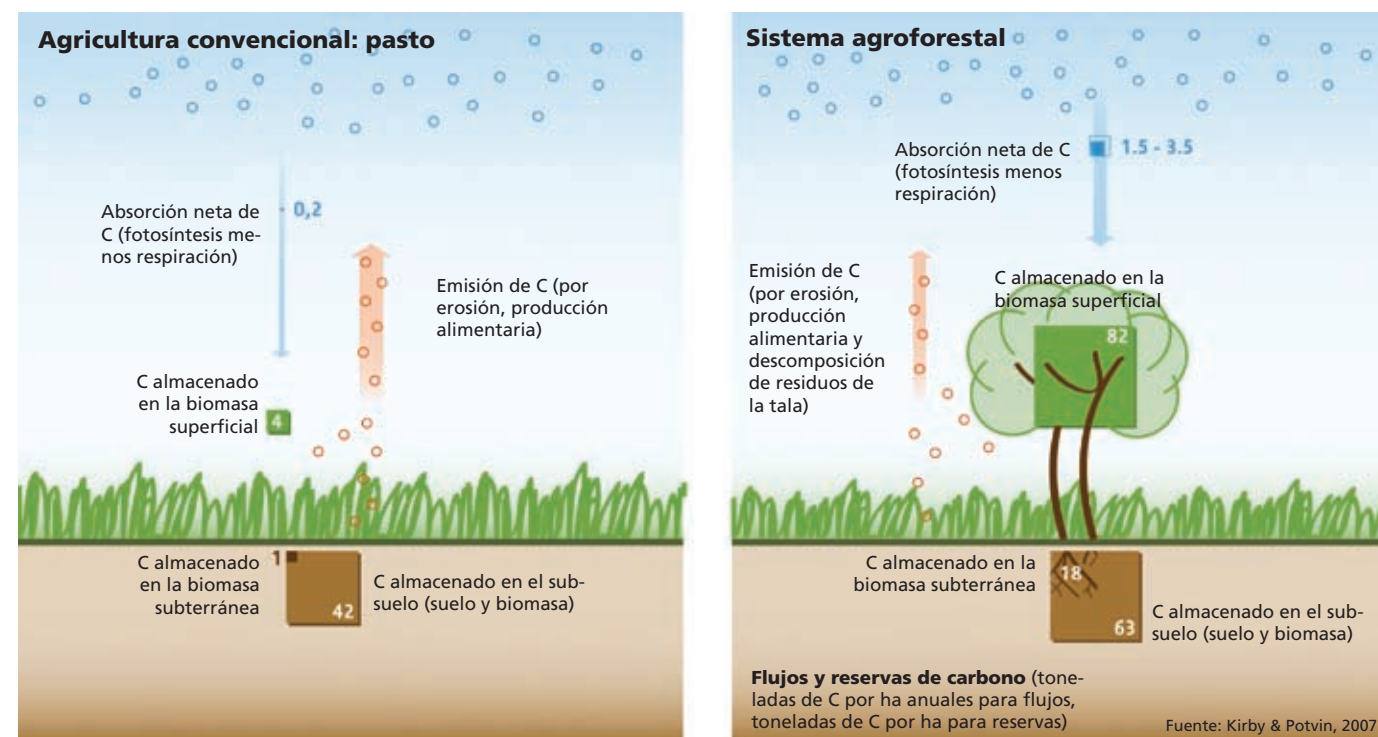
El biocarbón es una tecnología nueva que consiste en la reducción, por pirólisis, de materiales orgánicos a temperaturas de 350-500°C, lo que produce energía y un carbón vegetal rico en carbono, el que se devuelve al suelo como una forma estable de carbono. Los resultados de las investigaciones indican que el biocarbón tal vez tenga posibilidades de secuestrar cantidades considerables de carbono, al tiempo que ofrece beneficios en cuanto a la fertilidad del suelo y a la retención de nutrientes (Lehmann *et al.*, 2006).

No obstante, el establecimiento de plantaciones de biocarbón debe abordarse con mucha cautela. Aunque éste puede usarse de varias maneras, entre ellas, la rotación de cultivos, producción de carbón vegetal y reciclaje de residuos agrícolas (Lehmann *et al.*, 2006), la fuente a gran escala más probable para la producción de biocarbón es la quema de biocombustibles. Para tener justificación como estrategia para el almacenamiento de carbono, la cantidad secuestrada debe rebasar la producida al trasladarlo desde su sitio de producción, quemarlo y aplicarlo. En el caso de los residuos agrícolas, se debe garantizar que la adición de biocarbón represente una ganancia similar de carbono a la de simplemente devolver estos materiales al sitio de producción. Se desconoce cuáles serían los efectos de su producción a gran escala en la biodiversidad y la sostenibilidad agrícola a largo plazo (por ejemplo, agotamiento de nutrientes).



AGRICULTURA DE ZONAS TROPICALES

Existe un gran potencial para recuperar carbono en los suelos agrícolas tropicales mediante prácticas de gestión que, en las circunstancias adecuadas, fomenten también la productividad. La agroforestería puede ofrecer ganancias de carbono particularmente cuantiosas, aunque también aumentar la demanda de agua. Las políticas de secuestro de carbono agrícola deberán ajustarse a circunstancias particulares para permitir que se beneficien los agricultores.



Muchas zonas agrícolas en los trópicos han sufrido un severo agotamiento de sus reservas de carbono en el suelo. Se calcula que algunos suelos en dichas áreas han perdido de 20 a 80 toneladas de

carbono por hectárea, en su mayoría liberado a la atmósfera (Lal, 2004a). La erosión, la labranza y la quema o eliminación de los residuos agrícolas y los productos ganaderos reducen los niveles de

carbono en el suelo y, con el paso del tiempo, éstos se han degradado, lo que a menudo ha ocasionado el abandono de las tierras.

Como las tierras agrícolas de zonas tropicales poseen una amplia variedad de suelos y climas, la capacidad para el secuestro de carbono puede diferir considerablemente. En zonas calientes y áridas, donde se ha degradado el suelo, es posible restaurar el carbono y evitar más pérdidas. En climas húmedos, el potencial de secuestro de carbono puede llegar a una tonelada por hectárea. Según algunos cálculos, los suelos degradados representan la mitad del potencial mundial para el secuestro de carbono (Lal, 2004a).

Una práctica de gestión con alto potencial para el secuestro de carbono en áreas tropicales es la agroforestería. En los sistemas agroforestales, la producción de alimentos se



combina con la plantación de árboles. Gracias a los árboles, estos sistemas almacenan más carbono en forma de biomasa vegetal y tienen un mayor potencial de secuestro que los sistemas agrícolas convencionales (Nair *et al.*, 2009). También puede haber beneficios para la biodiversidad. Se calcula que el almacenamiento de carbono promedio mediante la aplicación de prácticas agroforestales es de alrededor de 10 toneladas por hectárea en regiones semiáridas, 20 toneladas por hectárea en regiones subhúmedas y 50 toneladas por hectárea en regiones húmedas, con tasas de secuestro de los sistemas agroforestales de pequeña escala en torno de 1.5-3.5 toneladas de carbono por hectárea al año (Montagnini & Nair, 2004). Además, los sistemas agroforestales pueden reducir la presión en los bosques naturales y, con ello, tener un efecto positivo indirecto en la acumulación de carbono en estos últimos (Montagnini & Nair, 2004).

Sin embargo, como ocurre con los sistemas agrícolas convencionales, en los agroforestales también se deben adoptar prácticas de gestión sostenible para asegurar el secuestro de carbono y el uso sostenible del agua.

En algunos sistemas, las interacciones de interferencia entre algunas especies para cultivo y árboles plantados como parte de las medidas agroforestales pueden tener un impacto negativo en el rendimiento del suelo (García-Barrios, 2003). En estas circunstancias, tal vez lo mejor sea una solución intermedia, tratando de acumular cantidades razonables de carbono y no las máximas, al tiempo que se asegura la rentabilidad de los cultivos (Verchot *et al.*, 2005).

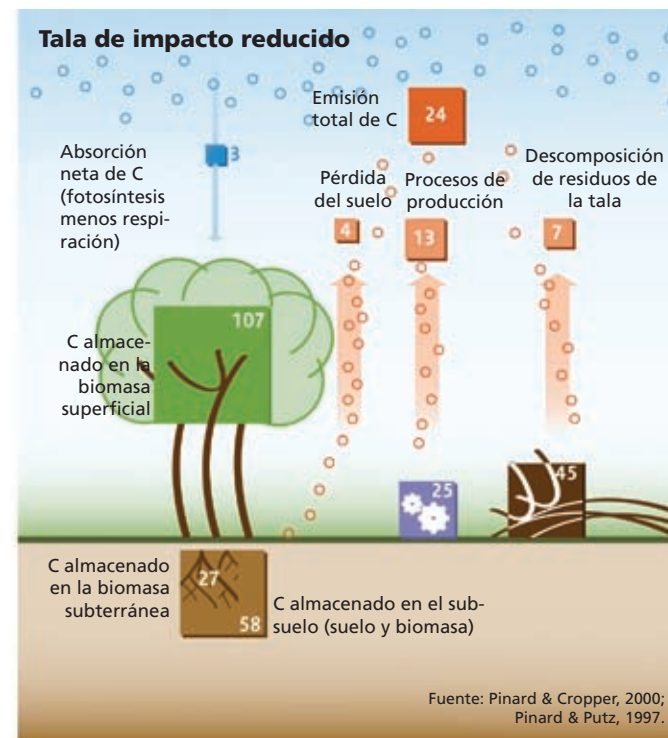
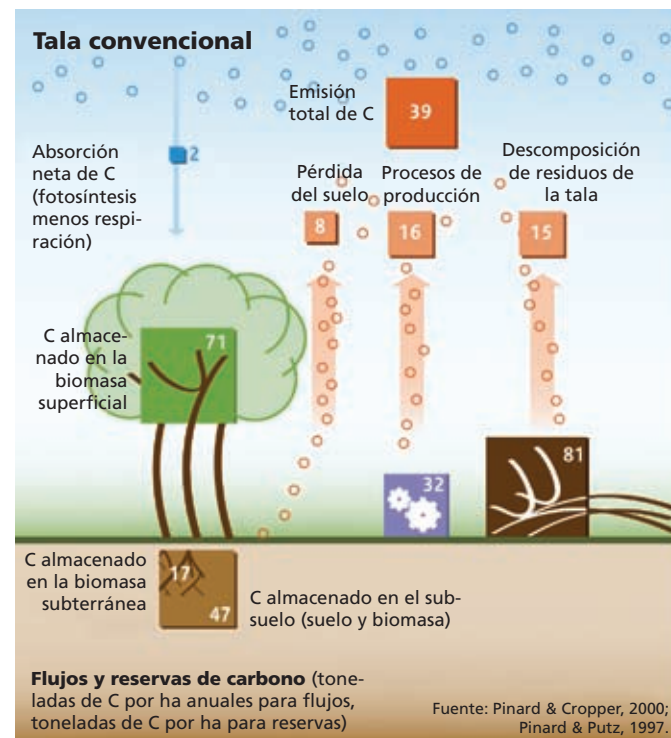
PLANTACIONES FORESTALES

Las actividades forestales para la obtención de madera se pueden adaptar a fin de aumentar la cantidad de carbono retenido en las plantaciones.

Aproximadamente 4 por ciento del área forestal mundial está representada por plantaciones (FAO, 2006), que suministran una proporción sustancial de la demanda de productos de madera. Las plantaciones pueden secuestrar cantidades considerables de carbono y por lo general se consideran sumideros de carbono, a menos que sustituyan a los bosques naturales, que suelen ser más ricos en este elemento. El mayor potencial de ganancia de carbono para las plantaciones está en las tierras agrícolas poco productivas y en los suelos degradados (Lal, 2004b). Sin embargo, en algunos casos las plantaciones agotan las reservas de carbono en el suelo, por lo que es necesaria una gestión cuidadosa. Al aumentar el periodo de rotación de la tala y aplicar estrategias para el mejoramiento de los sitios, se pueden reabastecer las reservas de carbono en el suelo y la vegetación puede tener mayor capacidad

de secuestro. El uso de rodales mixtos en lugar de monocultivos tiene efectos benéficos en la biodiversidad y reduce la aparición de plagas, al tiempo que mejora la producción maderera y el secuestro de carbono (Jandl *et al.*, 2007).

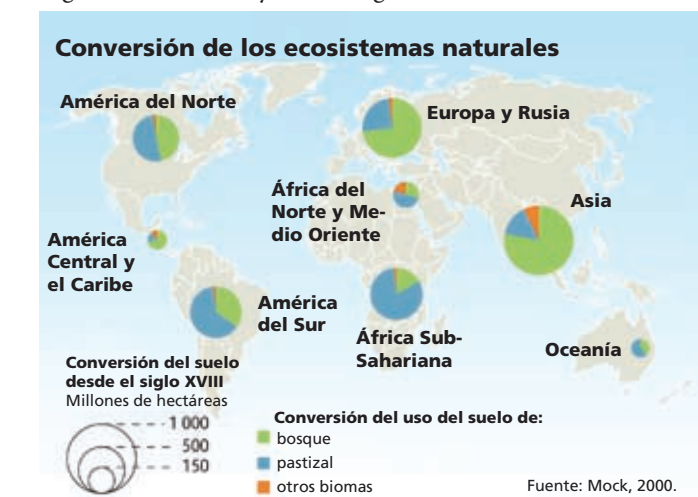
Esto pudiera tener otras compensaciones. Las plantaciones de árboles pueden apoyar la recarga de pozos de agua subterráneos y el afloramiento del vital líquido, pero también reducir considerablemente los caudales, además de salinizar y acidificar algunos suelos, lo que acarrea efectos negativos en la cantidad y calidad del agua, así como en la calidad del suelo (Jackson *et al.*, 2005). Los efectos negativos de la forestación en los suministros de aguas subterráneas y el caudal de los ríos son particularmente comunes en los trópicos secos (Bates *et al.*, 2008).



RESUMEN. ECOSISTEMAS DOMINADOS POR EL SER HUMANO

Queda claro que es necesario mantener grandes extensiones de tierra para uso agrícola, pero también es posible que el área requerida para la producción alimentaria se establezca en el futuro. Las mayores ganancias, fácilmente alcanzables, con el almacenamiento de carbono se encuentran en los sistemas agrícolas, donde hay un considerable potencial para mitigar las emisiones de carbono estimado en alrededor de 0.6 Gt CO₂e al año para 2030 (Smith *et al.*, 2008).

Si en el sector agrícola se adoptaran ampliamente prácticas de gestión óptimas, se calcula que se podrían secuestrar de 5.5 a 6 Gt CO₂e al año para 2030, cantidad comparable con las emisiones de ese sector. Alrededor de 90 por ciento de este potencial podría lograrse mediante la mejora de los sumideros de carbono (Smith *et al.*, 2007a) y, aproximadamente, 10 por ciento mediante la reducción de emisiones. La mayor parte (70 por ciento), puede llevarse a cabo en los países en desarrollo (Smith *et al.*, 2007b). La mayor posibilidad de mitigación radica en la gestión de las tierras de cultivo y de pastoreo, y en la rehabilitación de suelos orgánicos cultivados y tierras degradadas.



EFECTOS DEL FUTURO CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CARBONO DE LOS ECOSISTEMAS

El cambio climático tiene un efecto importante en los factores que rigen la absorción y acumulación de carbono en los ecosistemas y, por tanto, desempeña un papel fundamental en la capacidad de los ecosistemas para secuestrar carbono en el futuro.

ECOSISTEMAS TERRESTRES

Resultados de investigaciones hechas en los bosques tropicales amazónicos y africanos muestran que el almacenamiento de carbono por hectárea ha aumentado en las últimas décadas, posiblemente a consecuencia de las mayores concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera (Phillips *et al.*, 2008; Lewis *et al.*, 2009). El aumento en la biomasa vegetal va acompañado de un aumento en el carbono de origen vegetal que los suelos absorben de los detritos de hojas y raíces (Davidson & Janssens, 2006). Además, pueden aparecer “nuevos” sumideros de carbono en el Ártico y a grandes altitudes, si la elevación de la temperatura permite el crecimiento de vegetación (Schaphoff *et al.* 2006).

Sin embargo, de acuerdo con varios modelos sobre cambios futuros en el secuestro de carbono biológico, se proyecta que los ecosistemas terrestres servirán como sumideros sólo hasta 2050. A partir de esa fecha, podrían saturarse o, en el peor de los casos, actuar como fuentes de carbono hacia finales del siglo XXI (White *et al.*, 2000; Cox *et al.*, 2000; Cramer *et al.*, 2001; Joos *et al.*, 2001; Lenton *et al.*, 2006; Schaphoff *et al.*, 2006). Se han identificado varios factores relacionados con el cambio climático que contrarrestan el aumento generalizado en la absorción y el almacenamiento de carbono en los ecosistemas, en especial por la acción en conjunto con otras circunstancias causantes de la degradación de los ecosistemas (Nepstad *et al.*, 2008): la mayor temperatura acelera la descomposición del carbono en el suelo, por lo que éste se libera a la atmósfera

con mayor rapidez (respiración) (Heath *et al.*, 2005; Davidson & Janssens, 2006). Las tasas de respiración más elevadas en el otoño y la pérdida resultante de carbono en el suelo pueden convertir las áreas forestales boreales en fuentes de carbono (Piao *et al.*, 2008). Experimentos sobre fertilización en Alaska demostraron que, si bien anualmente el crecimiento vegetal superficial se duplicó, la pérdida de carbono y nitrógeno de las capas de suelo profundo contrarrestan con creces esta mayor acumulación de carbono en la biomasa vegetal (Mack *et al.*, 2004). Otros factores relacionados con el cambio climático pueden convertir los sumideros de carbono en fuentes, por ejemplo, el descongelamiento del *permafrost* en los ecosistemas del norte (Gruber *et al.*, 2004; Johansson *et al.*, 2006; Schuur *et al.*, 2008), un aumento en los niveles de ozono que inhiba la fotosíntesis (Felzer *et al.*, 2005) y los regímenes hidrológicos cambiantes que contribuyen a la muerte de los bosques tropicales (Fung *et al.*, 2005; Hutyra *et al.*, 2005; Nepstad *et al.*, 2007; Huntingford *et al.*, 2008). La severa sequía que azotó la selva húmeda del Amazonas en 2005, por ejemplo, provocó pérdidas considerables de carbono en la biomasa superficial, estimada en el orden de 1.2 a 1.6 Gt (Phillips *et al.*, 2009). Además, la probable modificación de la composición de las especies de los bosques tropicales a raíz del cambio climático puede tener un impacto considerable en su capacidad de almacenamiento de carbono (Bunker *et al.*, 2005).

“La vulnerabilidad de muchos procesos del ciclo del carbono y de los reservorios depende de la magnitud del futuro cambio climático. Ésta, a su vez, depende de la vulnerabilidad del ciclo del carbono.” (Gruber *et al.*, 2004: 52.)

ECOSISTEMAS OCEÁNICOS

Es difícil evaluar el impacto general del cambio climático en la capacidad oceánica de absorción de carbono. Las temperaturas más cálidas, sin duda, afectarán la absorción de carbono inorgánico, porque el CO₂ se disuelve con menor facilidad en agua tibia que en agua fría. Asimismo, las mayores temperaturas aumentan la estratificación de las aguas marinas y desaceleran la rotación entre las superficiales y las profundas, lo que ocasiona una menor transferencia de carbono inorgánico disuelto al fondo del océano. Un estudio pronosticó que la capacidad de los océanos para absorber carbono inorgánico podría llegar a 5 Gt al año, como nivel más alto, y que esto sucedería hacia finales del siglo XXI (Cox *et al.*, 2000).

La mayor presencia de carbono inorgánico disuelto en el agua de mar puede tener un efecto fertilizante, de modo que la biomasa de los grupos fotosintéticos, como las algas marrones y los pastos marinos, aumenta cuando lo hace el dióxido de carbono (Guinotte & Fabry, 2008). Según estudios in situ recientes en un respiradero natural de dióxido de carbono en Isquia, Italia, las comunidades de pastos marinos florecen en ambientes con más CO₂ (Hall-Spencer *et al.*, 2008).

Cermeno *et al.* (2009) predicen que, a causa de la estratificación térmica, el calentamiento global disminuirá aún más la eficiencia del secuestro de carbono de la llamada bomba biológica y, por consiguiente, reducirá el suministro de nutrientes a las capas oceánicas más profundas. Los modelos del carbono han demostrado que la tasa de absorción orgánica de CO₂ en el océano se puede reducir 9 por ciento como consecuencia de

los efectos del cambio climático (mediante la reducción del suministro de hierro transportado por el viento al océano, lo que ocasiona una menor productividad) (Ridgwell *et al.*, 2002). En el caso del océano Antártico, se ha observado un debilitamiento del sumidero de carbono en las últimas dos décadas y no sabemos a ciencia cierta si esta tendencia continuará o se revertirá (Le Quéré *et al.*, 2007; Le Quéré *et al.*, 2008).

Las consecuencias ecológicas de la acidificación del océano ocasionada por la mayor absorción de carbono inorgánico son aún desconocidas. No obstante, se espera que la acidificación progresiva reduzca la acumulación de carbonato en las conchas, huesos y esqueletos de la mayoría de los organismos marinos, lo que tiene un impacto en las cadenas alimentarias, desde el plancton, que produce carbonato, hasta niveles tróficos más elevados (The Royal Society, 2005; Nellemann *et al.*, 2008)

En términos generales, mientras que la mayoría de los modelos climáticos coinciden en que los ciclos del carbono en tierra y en los océanos se verán afectados por el futuro cambio climático, hay muchas dudas sobre la magnitud de estos impactos (Friedlingstein *et al.*, 2006). Existe gran incertidumbre sobre la respuesta de las selvas tropicales húmedas de América del Sur y África al cambio climático, que depende en gran medida de la severidad de los cambios en la precipitación (Schaphoff *et al.*, 2006). Los experimentos de campo a gran escala, como FLUXNET, podrían ser muy útiles para mejorar los modelos actuales del carbono y del clima (Running, 2008; Baldocchi, 2008).



OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS

El potencial técnico para mitigar el cambio climático mediante la gestión del carbono biológico, su almacenamiento y secuestro es grande. Llevarlo a cabo depende de contar con un marco de políticas adecuadas que lo permita. En esta sección veremos la manera en que se aborda este tema en la política climática vigente, así como algunas de las oportunidades y desafíos para fomentar el papel que puede desempeñar.

GESTIÓN DEL CARBONO EN LOS ECOSISTEMAS CONFORME A LA POLÍTICA INTERNACIONAL EN MATERIA DE CLIMA

La política internacional en materia de clima sólo aborda parcialmente las emisiones ocasionadas por el cambio en el uso del suelo y contribuye poco a apoyar las actividades de secuestro biológico. El establecimiento de un marco general de políticas, bajo la CMNUCC, para abordar la gestión del carbono en los ecosistemas, representaría un avance muy significativo.

El potencial de manejo del carbono en los ecosistemas es reconocido por la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y el Protocolo de Kyoto, a través del LULUCF (uso del suelo, cambio en el uso del suelo y actividades forestales, por sus siglas en inglés), el sector de uso del suelo, cambio en el uso del suelo y actividades forestales. De acuerdo con el LULUCF, los países desarrollados (Anexo I) deben informar sobre los cambios en su reservas de carbono derivados de la forestación, reforestación y deforestación (desde 1990), y también tienen la opción de informar sobre actividades adicionales de gestión forestal, gestión de tierras de cultivo, gestión de tierras de pastoreo y revegetación (Robledo & Blaser, 2008). Los países en desarrollo no tienen la obligación de notificar sus actividades en materia de emisiones y secuestro en el sector de uso del suelo. Aunque los países desarrollados pueden recibir reconocimiento por proyectos de actividades forestales efectuados en países en desarrollo, mediante el Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL), las reglas son

restrictivas (Dutschke, 2007; Schlamadinger *et al.*, 2007) y hasta el momento en que se redactó este documento sólo habían sido aceptados tres proyectos forestales conforme al MDL.

El marco de políticas vigente para el sector de uso del suelo tiene varias deficiencias (Cowie *et al.*, 2007; Schlamadinger *et al.*, 2007; Hohne *et al.*, 2007). Una de ellas es la falta de participación de los países en desarrollo, como ya se señaló. Otra preocupación es la cobertura incompleta de las fuentes y los sumideros de carbono porque las Partes sólo están obligadas a dar cuenta de sus actividades forestales. Las actividades restantes son voluntarias y no hay opción para informar sobre los humedales (Schlamadinger *et al.*, 2007; Henschel *et al.*, 2008). Otros problemas incluyen los complejos requisitos de vigilancia e informes, el requisito de presentar información exclusivamente sobre las tierras gestionadas y las dificultades para discriminar entre las perturbaciones antropogénicas y las naturales (Benndorf *et al.*, 2007). Pero, tal vez, la mayor

crítica es que cuando se establecieron los objetivos para los países en desarrollo no se consideraron las reducciones de emisiones correspondientes al sector de uso del suelo, pero aun así éstas pueden ser utilizadas para cumplir con ellos. Esto ha hecho que muchos vean el LULUCF como un mecanismo de compensación, no un sector que permite lograr reducciones generalizadas de emisiones (Cowie *et al.*, 2007; Schlamadinger *et al.*, 2007).

Dichas deficiencias significan que la gestión del carbono en los ecosistemas no cuenta actualmente con el apoyo de una política internacional. Esto podría cambiar en el futuro, pues se está deliberando sobre el siguiente acuerdo en materia de clima. El hecho de que se establezca o no un marco de políticas más eficaz dependerá de cuestiones como si se incluirán “todas las tierras” y de que el LULUCF deje de ser visto como un mecanismo de compensación para pasar a ser un sector capaz de producir reducciones reales en las emisiones (Cowie *et al.*, 2007; Schlamadinger *et al.*, 2007; Benndorf *et al.*, 2007; Hohne *et al.*, 2007). El desarrollo de una nueva política no es un asunto fácil. El LULUCF se formuló a partir de un proceso político complejo, en el contexto de una considerable incertidumbre científica, y hay varios factores que dificultan contabilizar las emisiones causadas por el uso del suelo, por ejemplo, los temas de permanencia, fuga de carbono y adicionalidad (véase glosario), que será necesario atender.

Gran parte del debate sobre los compromisos respecto al uso del suelo en el futuro se ha centrado en los bosques. El Plan de Acción de Bali, adoptado por la CMNUCC en su XIII Conferencia de las Partes (COP-13), celebrada en Bali en diciembre de 2007, encomienda a las Partes la negociación de un instrumento posterior a 2012, que permita la reducción de emisiones de carbono causadas por la deforestación y la degradación de los bosques (REDD, por sus siglas en inglés) en los países en desarrollo (Decisión 1/CP.13). Las Partes especificaron que la elaboración de ese instrumento debía tener en consideración “la función de la conservación, la gestión sostenible de los bosques y el aumento de las reservas forestales de carbono en los países en desarrollo”. Con la inclusión del REDD en el siguiente acuerdo sobre el clima, se abordarán en parte las emisiones procedentes del sector de uso del suelo en los países en desarrollo. Aún está por determinarse el alcance

del REDD, pero podría elevar considerablemente el potencial para la gestión del carbono si incluye la mejora de las reservas (Eliasch, 2008).

Aunque la reducción de las emisiones del sector forestal sin duda es importante, en este informe también hemos destacado la necesidad de reducir las emisiones mediante actividades en los ecosistemas no forestales, en particular las turbas y la agricultura. Esto requerirá hacer inversiones en las actividades apropiadas para el uso del suelo (Hohne *et al.*, 2007) y se ha recomendado la inclusión del carbono no forestal en cualquier protocolo que suceda al de Kyoto. The Terrestrial Carbon Group es una organización que defiende la inclusión de toda la biomasa y el carbón en el suelo (TCG, 2008), la FAO ha propuesto la inclusión de la agricultura argumentando que su potencial de mitigación es alto en relación con las emisiones del sector (FAO, 2009) y varios autores han subrayado la importancia de tener la contabilidad completa del carbono en el sector de uso del suelo (Cowie *et al.*, 2007; Schlamadinger *et al.*, 2007; Benndorf *et al.*, 2007; Hohne *et al.*, 2007).

Aunque, en general, existe el consenso de que cualquier acuerdo futuro sobre cambio climático debe tener por objeto la reducción de todas las emisiones antropogénicas derivadas del sector de uso del suelo (mediante una combinación de actividades del LULUCF y el REDD), aún no tenemos claro si esto se logrará. Se está deliberando sobre mejoras en la cobertura de las actividades del sector de uso del suelo en el marco del LULUCF, para el siguiente acuerdo sobre el clima, en la medida en que existe la opción de incluir informes sobre turbas y humedales (FCCC/KP/AWG/2009/L.3), y de que es probable que el marco para la contabilidad del carbono se vuelva más riguroso. No obstante, también es factible que la mayoría de las actividades adicionales sigan siendo voluntarias, pues parece que la contabilidad obligatoria en todos los ecosistemas no parece posible ni política ni técnicamente. Además, todavía no se ha determinado la relación entre el LULUCF y el REDD. En este momento no parece viable que se obligue a los países en desarrollo a dar cuenta de las emisiones de algún otro ecosistema además de los bosques.

Como cualquier política para la gestión del carbono en el suelo que debe considerar la tenencia de la tierra y cuestiones

de aplicación y cumplimiento de la legislación, adquieren pertinencia varios instrumentos internacionales en materia de derechos humanos, como el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, y la Declaración de las Naciones Unidas sobre los Derechos de los Pueblos Indígenas (Brown *et al.*, 2008). En el contexto de los acuerdos ambientales multilaterales, se ha reconocido la necesidad de explorar las sinergias entre la CMNUCC y el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) con los vínculos de los planes nacionales de desarrollo (Reid & Huq, 2005; Blakers, 2008) y las inevitables imbricaciones con la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD), pues la desertificación, la biomasa y el cambio climático también guardan una estrecha relación (Lal, 2007). Sin embargo, las

diferencias entre los convenios en las circunscripciones y su régimen administrativo siguen planteando desafíos.

En la medida en que la política en materia climática abarque adecuadamente las emisiones y absorciones en tierra, y logre reducciones reales de las emisiones, es posible que influya en que los países pongan en práctica la gestión del carbono en los ecosistemas. Las políticas de mitigación actuales, basadas en el uso del suelo, no ofrecen las condiciones para instaurar los mecanismos de incentivos recomendados en este informe. El establecimiento de un marco de políticas integral para abordar la gestión del carbono en los ecosistemas, bajo la CMNUCC, constituiría un avance muy significativo.

¿CUÁL SERÁ EL COSTO? ¿CÓMO PODEMOS PAGARLO?

La gestión del carbono en los ecosistemas puede ser una actividad de mitigación de bajo costo, pero es probable que su potencial mundial dependa, en buena medida, de los incentivos financieros disponibles para los principales actores. Estos instrumentos pueden derivarse de un instrumento no comercial como un fondo internacional, del mercado del carbono o de una combinación de ambos. Las oportunidades para mitigar las emisiones de carbono en los ecosistemas son limitadas en los mercados obligatorios actuales, aunque esto podría cambiar si el REDD se vincula con el mercado del carbono. El mercado voluntario es de menores dimensiones, pero ofrece modelos para incluir el carbono no forestal y recompensar la conservación de la biodiversidad. Entre los obstáculos para la inclusión del carbono de los ecosistemas figuran los altos costos de operación y problemas relativos a la contabilidad y a la permanencia. Factores como la gestión de los asuntos públicos y los subsidios también influyen en las decisiones sobre uso del suelo y, por ende, afectan lo que sucede con el carbono de los ecosistemas.



Las naciones que sopesan cuál es la mejor forma para mitigar el cambio climático necesitan considerar la relación costo-beneficio de las opciones disponibles. ¿Es un buen negocio la gestión del carbono de los ecosistemas?

Los costos de mitigar las emisiones de carbono evitando la deforestación, sobre todo en las turbas tropicales, pueden ser muy bajos en comparación con las opciones de “energía limpia” (Spracklen *et al.*, 2008). En la agricultura, los costos de esta



mitigación varían, pero en muchos casos son bajos: la gestión del pastoreo, los fertilizantes y la quema en pastizales cuestan apenas EU\$ 5 por tonelada de CO₂e al año. El costo de rehabilitación de suelos y tierras degradadas asciende a alrededor de EU\$ 10 por tonelada de CO₂e al año (Smith *et al.*, 2008). Para poner en contexto estos costos, el IPCC determinó que los de la captura y almacenamiento de carbono (CAC) oscilaban entre EU\$ 20 y EU\$ 270 por tonelada de CO₂e (IPCC, 2005).

Aunque la gestión del carbono en los ecosistemas no es necesariamente muy costosa, otros usos del suelo pueden ofrecer un mejor rendimiento, al menos localmente y a corto plazo. Un factor que puede cambiar el balance es el nivel de incentivos ofrecidos a los propietarios de tierras. Si éstos son mayores, se logrará una gestión del carbono más competitiva comparado con otros usos del suelo. Por ejemplo, el potencial económico de mitigar las actividades forestales se duplicaría si los precios del carbono subieran de EU\$ 20/t CO₂e a EU\$ 100/t CO₂e (IPCC, 2007a). Estos niveles de secuestro de carbono podrían compensar entre 2 y 4 por ciento de las 20 Gt C anuales de emisiones proyectadas para 2030, con base en las tasas de crecimiento actuales (Canadell *et al.*, 2007; Raupach *et al.*, 2007).

En el caso de la agricultura, el mismo aumento en el precio del carbono (de EU\$ 20 a EU\$ 100 por tonelada de CO₂e) duplica creces el potencial económico de la mitigación de las emisiones de dicho gas (de 1.5Gt CO₂e al año a 4 Gt CO₂e al año, Smith *et al.*, 2007a).

Como señalamos anteriormente, sólo las actividades de forestación y reforestación tienen acceso al mercado mundial



del carbono mediante el Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kyoto, y son muy pocos los proyectos de actividades forestales en curso. Los mercados voluntarios del carbono son mucho más pequeños que el mercado regulado, pero ahí están mejor representados los proyectos de actividades forestales, que constituyen alrededor de la quinta parte de todas las operaciones (Ebeling & Fehse, 2009). Algunos mercados voluntarios permiten los proyectos no forestales relacionados con el carbono: la Chicago Climate Exchange (CCX) permite las compensaciones mediante la gestión de tierras de pastoreo y agrícolas en Estados Unidos (Chicago Climate Exchange, 2008).

Ofrecer incentivos financieros directos para la gestión del carbono en los ecosistemas es sólo una de muchas opciones para cambiar las decisiones relacionadas con el uso del suelo. En cuanto a los bosques, las estrategias para evitar la deforestación pueden incluir la eliminación de incentivos perversos, cambiando subsidios para insumos, sistemas de titulación de tierras, acuerdos sobre gestión forestal y regímenes fiscales. También se pueden establecer incentivos positivos para cambiar directa o indirectamente los factores que impulsan la deforestación, incluido el fortalecimiento de los derechos de propiedad. En la agricultura, tal vez algunas intervenciones no requieran un incentivo financiero porque son de suyo benéficas, pero sí requieren inversión para el intercambio de prácticas óptimas (véase más adelante). Aun dentro del esquema de los incentivos financieros, un sistema más amplio de pagos por los servicios de los ecosistemas puede ser más apropiado para ciertos ecosistemas y tipos de agricultura. Seleccionar la combinación adecuada de incentivos dependerá de cuáles sean las políticas y los procesos que impulsen el cambio en el uso del suelo.

COMPETENCIA POR EL SUELO Y ASPECTOS DE SUBSISTENCIA

Hay demandas en pugna por el uso del suelo. Cualquier política encaminada a fomentar la gestión del carbono en los ecosistemas debe solucionar los conflictos entre los diferentes usos del suelo y cuidar que los pobres no resulten perjudicados.

Las políticas con efectos positivos en el almacenamiento y secuestro de carbono en los ecosistemas terrestres (tanto naturales como dominados por el ser humano) podrían tener por objeto asegurar que continúe el uso actual del suelo —por ejemplo, mediante una mayor protección de las áreas de reserva que albergan acumulaciones considerables de carbono, como los bosques de turba pantanosa—, o lograr un cambio a gran escala en el uso del suelo, por ejemplo, modificando las prácticas agrícolas. Cualquiera de estas políticas, y sus repercusiones, deberán analizarse en el contexto de otras necesidades y usos del suelo, tal vez en pugna: producción alimentaria, espacio habitacional, mantenimiento de la biodiversidad, recreación y satisfacer demandas estéticas y espirituales (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Entonces, ¿cómo puede la gente optimizar el uso y la gestión del suelo para necesidades tan diversas? Un enfoque consiste en maximizar la eficiencia del uso del suelo para un propósito predominante —como la producción de alimentos o zonas habitacionales— en un lugar, con lo que se deja más suelo disponible para otros usos (como recreación, conservación de especies o secuestro de carbono). Otro enfoque es buscar múltiples usos o beneficios en una sola extensión de suelo (Green *et al.*, 2005).

Cualquiera que sea el enfoque elegido, es casi seguro que se requieran compensaciones y, en cada caso, determinadas

personas o grupos asignarán diferentes prioridades a diferentes tipos de uso del suelo. Cuando distintos usos de suelo en pugna, es probable que surjan conflictos, con una alta probabilidad de que haya diferentes “ganadores” y “perdedores”, al menos a corto y mediano plazo. Sin una planificación cuidadosa, las más de las veces serán los pobres y los desfavorecidos quienes pierdan, por varias razones: a menudo dependen mucho de los recursos locales y no están en condiciones de comprar sustitutos; por lo general tienen menos voz en la toma de decisiones en todos los ámbitos, pero en particular en el nacional y el internacional; y pueden tener menos conocimientos o capacidad para recurrir a las leyes, reglamentos y políticas a fin de defender sus necesidades y aspiraciones.

De particular preocupación sería el uso de varios tipos de incentivos financieros, por ejemplo, para fomentar el cultivo de biocombustibles o la forestación a gran escala destinada al secuestro de carbono. En muchos casos, dichos incentivos aumentarán el valor de una tierra hasta entonces considerada de escaso valor comercial. En algunas ocasiones, esas tierras pueden ser, en efecto, poco productivas; en estos casos, es probable que los conflictos sean menores. Sin embargo, en otras ocasiones puede no ser así. La tierra puede ser de gran importancia para la gente del lugar —como pastizales para el ganado, como fuente de alimento silvestre u otros recursos— o para la biodiversidad, o ambas cosas. El uso al que se destine esa tierra puede tener como consecuencia pérdidas en la



diversidad y que los habitantes del lugar se vean privados de beneficios tradicionales a cambio de una escasa compensación, si acaso. Para que esto no suceda, en cualquiera de los esquemas de incentivos se debe tener en cuenta todo el espectro de valores de la tierra y se deben reconocer, tanto la tenencia de la misma, según las costumbres, como los derechos de acceso tradicionales. Hay que permitir a los habitantes del lugar tener una participación plena en la toma de decisiones y alentarlos a participar (Rights and Resources Initiative, 2008).

En todo caso, es probable que las medidas basadas en incentivos que incluyen la participación de los habitantes locales tengan costos de operación más altos y atraigan una menor inversión. También, existe el peligro de que los pobres acepten actividades (como la plantación de árboles) cuya realización implica un costo mayor que el pago que aceptaron (Campbell *et al.*, 2008; Coad *et al.*, 2008). Además, puede ocurrir que los beneficios para la comunidad se sujeten a desigualdades locales, incluidas las de género, que no se distribuyan equitativamente y que los costos recaigan de manera desproporcionada en los más pobres (Parasai, 2006).

Sin embargo, con una planificación cuidadosa, no hay razón intrínseca para que las políticas que favorecen el almacenamiento y secuestro de carbono no beneficien a las localidades. Esto se aplica, en particular, a la agricultura, donde hay un gran margen para aumentar el almacenamiento de carbono, de manera que también mejore la productividad a largo plazo. Hay, sin embargo, obstáculos, a menudo considerables, para modificar las prácticas agrícolas, en particular cuando los agricultores tienen poco acceso a la información y los recursos. Para superar esto, probablemente se requieran insumos externos, como mínimo en forma de fomento de capacidades e introducción de tecnologías apropiadas. Como se comentó en el apartado sobre agricultura, las diferentes maneras de aumentar el contenido de carbono en el suelo serán apropiadas en diferentes circunstancias. Las políticas de gestión demasiado prescriptivas sobre la selección de tecnología podrían presionar a agricultores y gestores de tierras a adoptar métodos inadecuados para ellos, con consecuencias negativas para sus medios de subsistencia. La experiencia indica que los agricultores prefieren disponer de una serie de tecnologías para ponerlas a prueba y muchas veces adaptarlas. De hecho, algunos verían esto como parte de

un proceso en el que ellos realmente desarrollan la tecnología (Sumberg & Okali, 1997). Muchas de las prácticas agrícolas que acumulan mayor cantidad de carbono pueden aplicarse a un costo bajo o, incluso, nulo (Smith, 2004), y si los agricultores deciden que las medidas valen la pena seguirán aplicándolas, aunque ya no cuenten con financiamiento externo, lo que genera un efecto de mitigación mayor de lo que se ha pagado.

TENDENCIAS PROBABLES EN EL FUTURO

Conocer y entender las tendencias probables para el futuro uso del suelo, y los factores que influyen en ellas, constituye una parte crucial de cualquier tentativa de gestionar el carbono en los ecosistemas. En su cuarto informe de evaluación, el IPCC analizó los impulsores del cambio en el uso del suelo en lo que respecta a la demanda de productos y servicios en tierra, como demanda de alimentos, por un lado, y las posibilidades de producción y costos de oportunidad, como el cambio tecnológico, por el otro (IPCC, 2007a). Podemos considerar que el crecimiento demográfico y el desarrollo económico son los impulsores primarios.

Algunos estudios mundiales han hecho proyecciones del uso del suelo a largo plazo con base en escenarios basados en éste y otros factores, por ejemplo, los propios informes especiales sobre escenarios de emisiones del IPCC, las Perspectivas del Medio Ambiente Mundial del PNUMA y la Evaluación de Ecosistemas del Milenio. A corto plazo, casi todos los escenarios indican un crecimiento de las tierras de cultivo (IPCC, 2007a).

Los escenarios a más largo plazo son mixtos. Los que parten del supuesto de mayores tasas demográficas y demandas de alimento, con menores tasas de avance tecnológico y, por ende, aumentos en el rendimiento de los cultivos, indican una gran expansión (hasta 40 por ciento) de las tierras agrícolas entre 1995 y 2100. Los que parten del supuesto de menores poblaciones, con un alto grado de cambio tecnológico, indican que las tierras agrícolas podrían reducirse hasta 20 por ciento a finales del siglo.

BENEFICIOS PARA LA BIODIVERSIDAD Y LOS SERVICIOS DE LOS ECOSISTEMAS

Aplicar políticas que protejan y permitan recuperar el carbono en los ecosistemas también puede traer beneficios para la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas, pero es probable que esto sólo ocurra si se formulan teniendo presentes estos objetivos.



En los análisis sobre la gestión del carbono en los ecosistemas se reconoce que ésta debe ofrecer múltiples beneficios para ser políticamente aceptable. Pero no se pueden esperar esos beneficios en ausencia de otras políticas: deberán coordinarse las prioridades y será necesario contar tanto con políticas transversales nacionales e internacionales, como con el apoyo de la investigación interdisciplinaria (Lal, 2007; Miles & Kapos, 2008). Las medidas para gestionar el carbono tienen grandes posibilidades de ofrecer diversos beneficios, como mantenimiento de áreas biodiversas y mejoramiento de los servicios de los ecosistemas, por ejemplo, la fertilidad del suelo (UNEP-WCMC, 2008; Eliasch, 2008; Reid & Swiderska, 2008).

Es muy probable que los mecanismos del REDD sean beneficiosos para la biodiversidad y puedan formularse de tal modo que, al mismo tiempo, beneficien a los usuarios de recursos locales. El desafío estriba en elaborar regulaciones que logren ambas cosas, con lo que se evitarían las compensaciones entre biodiversidad y medios de subsistencia. En general, los mecanismos que incluyen, entre otras medidas, reducir la degradación forestal, probablemente tengan un efecto positivo mayor en la biodiversidad que aquellos restringidos a reducir la deforestación. Las actividades de reforestación también pueden tener efectos positivos en la biodiversidad (Strassburg, 2007; Strassburg *et al.*, 2008; TCG 2008); en cambio, la forestación muchas veces tiene efectos negativos.

Se está trabajando en varias herramientas cartográficas que sirvan de apoyo para la selección de los sitios de los proyectos del REDD, pues se identificarán las áreas ricas tanto en carbono como en biodiversidad (UNEP-WCMC, 2008).

La Alianza por el Clima, la Comunidad y la Biodiversidad (CCBA, por sus siglas en inglés) formuló las normas CCB, las de mayor uso y reconocimiento internacional para los beneficios múltiples de los proyectos relacionados con el carbono en tierra (CCBA, 2008). Su objetivo es fomentar la instrumentación de proyectos del LULUCF en el marco del Protocolo de Kyoto, con efectos positivos netos en la biodiversidad y en el bienestar social y económico (Taiyab, 2006). Ya se han aprobado seis proyectos, están en dictamen otros diez y hay otros cien en espera de ser dictaminados (CCBA, 2008). Por consiguiente, las enseñanzas obtenidas de la aplicación de estas normas podrían ser muy importantes en otras negociaciones relacionadas con políticas sobre medidas para la gestión del carbono en los ecosistemas.



CONCLUSIONES

El hecho de que estemos causando efectos profundos y de gran alcance en el clima del mundo ya no está en tela de juicio. Como resultado de las actividades humanas, las concentraciones en la atmósfera de los llamados gases de efecto invernadero, sobre todo dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), alcanzan hoy niveles no vistos, al menos en los últimos 650000 años, y siguen creciendo a un ritmo sin precedentes. Alrededor de dos tercios del aumento de estos gases, en los últimos 150 años, aproximadamente, puede atribuirse a la quema de combustibles fósiles. En su mayoría, la cantidad restante es consecuencia de los cambios en el uso del suelo y una pequeña proporción lo es de la quema de carbonato de calcio para la producción de cemento. El cambio en el uso del suelo —particularmente la deforestación— genera aumento en los gases de efecto invernadero, sobre todo mediante la emisión del carbono almacenado en la biomasa.

Los gases de efecto invernadero emitidos como consecuencia de acciones humanas forman parte de los ciclos del carbono y del nitrógeno. A causa de estos ciclos, no todos estos gases permanecen en la atmósfera: se calcula que en los últimos 150 años los océanos han absorbido casi 30 por ciento de estas emisiones, y los ecosistemas terrestres poco menos de ese porcentaje.

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) considera que a fin de evitar los peores efectos del cambio climático, se deben establecer, como mínimo, concentraciones de gases de efecto invernadero equivalentes a

445-490 ppm de dióxido de carbono. La concentración actual es de alrededor de 430 ppm de CO_2e . A las tasas actuales de emisión de CO_2 , el umbral de 445 ppm de CO_2e se alcanzará en sólo siete años, incluso antes si continúa la producción acelerada que se ha observado en los primeros años de este siglo.

Las concentraciones de gases de efecto invernadero pueden estabilizarse reduciendo su tasa de emisiones, aumentando la tasa de absorción de gases, o ambas cosas. La reducción de las emisiones originadas por el uso de combustibles fósiles es, sin duda, de primordial importancia. Las tecnologías de captura del carbono de los gases de efecto invernadero procedentes de puntos de emisión concentrados, como las centrales eléctricas, ofrecen alguna esperanza de reducir las tasas de emisiones, aunque sigue siendo incierto cuál será el impacto general a corto o mediano plazo.

Pero la gestión del uso de combustibles fósiles y la adopción de tecnologías de captura de carbono no bastarán para evitar un severo cambio climático en las próximas décadas. La gestión del carbono en los sistemas vivos tiene una función de suma importancia: aun con disminuciones drásticas en las emisiones derivadas de los combustibles fósiles, las prácticas actuales de uso del suelo seguirían ocasionando aumentos considerables en las concentraciones de gases de efecto invernadero. Esta gestión tiene dos componentes fundamentales: garantizar que las reservas de carbono existentes en los ecosistemas naturales y mantener las zonas agrícolas seguras; y tratar de elevar el ritmo al que se secuestra el carbono en estos sistemas.

Actualmente algunos aspectos del ciclo del carbono escapan al control de las políticas directas o la intervención tecnológica, sobre todo el comportamiento de los océanos como mediadores del ciclo del carbono y del clima mundial (se están llevando a cabo experimentos de fertilización a gran escala para intentar mejorar la fijación del carbono mediante la fotosíntesis oceánica, pero es poca la influencia humana que puede haber en la función física y puramente química del océano en el ciclo del carbono). De manera similar, el calentamiento en latitudes altas provocará el derretimiento parcial de la capa de suelo profunda permanentemente congelada, *permafrost*, lo que liberará a la atmósfera una muy buena parte del carbono acumulado ahí. Hoy no contamos con tecnologías para evitar que esto suceda: la única medida certera es empezar por prevenir el calentamiento. En general, también parece que, en la actualidad, son relativamente pocas las posibilidades de aumentar de manera activa el almacenamiento de carbono en los ecosistemas más naturales o en gran parte naturales.

Sin embargo, hay muchas áreas donde políticas apropiadas e intervenciones directas podrían tener efectos importantes. Hay grandes cantidades de carbono almacenadas en las turbas de todo el mundo y en los bosques tropicales húmedos que aún quedan. Protegerlos de la desecación y del clareo ayudaría

mucho a desacelerar el ritmo al que aumentan los gases de efecto invernadero y traería consigo valiosos beneficios para la biodiversidad. De particular importancia son los bosques de turba pantanosa del sureste de Asia —irónicamente amenazados por la tala para la producción de biocombustibles, a pesar de que su valor como reservas de carbono supera enormemente los posibles beneficios relacionados con el carbono que se obtendría de los cultivos de biocombustibles que los están sustituyendo.

Los sistemas agrícolas ofrecen muchas oportunidades para el secuestro activo del carbono y la reducción de sus emisiones. Las reservas de carbono de las tierras dedicadas a la agricultura suelen tener sus reservas de carbono agotadas, pero podrían restaurarse adoptando técnicas apropiadas, como la labranza para la conservación y la gestión integral de nutrientes usando composta y abono. En términos generales, si se adoptaran ampliamente las prácticas de gestión óptimas, el sector agrícola podría volverse, en buena medida, neutro en emisiones de carbono para 2030.

Esto no sólo es técnicamente posible, sino también viable desde el punto de vista económico. De hecho, el IPCC llegó a la conclusión de que si se asignara un nivel apropiado de valor

o costo a las emisiones de carbono (EU\$ 100 por tonelada de CO₂e), en 2030 el sector agrícola ocuparía el segundo lugar, sólo después de la construcción, como uno de los sectores potencialmente más importantes por su contribución a mitigar el cambio climático. En ese nivel de precios del carbono, las actividades forestales y la agricultura combinadas adquieren más importancia que cualquier otro sector individual. Aun con precios de carbono más bajos, ambos sectores conservarían un elevado potencial para la mitigación.

Sin embargo, hay muchos desafíos que superar para lograr una instrumentación eficaz. El mayor potencial de aumento en el almacenamiento de carbono, en sistemas agrícolas, se encuentra en el mundo en desarrollo, donde la falta de conocimientos y el acceso a las tecnologías apropiadas constituyen grandes obstáculos para el cambio. Para vencer esos obstáculos, se requiere un compromiso con el fomento de capacidades a escala muy grande. Los sistemas basados en incentivos para fomentar, por ejemplo, la plantación de biocombustibles en tierras poco productivas, necesitan una planificación y ejecución muy cuidadosas para no producir efectos adversos en los medios de subsistencia locales, en la biodiversidad o incluso en las reservas de carbono.

Si la comunidad mundial acepta estos desafíos, los sistemas vivientes del planeta podrán desempeñar un papel crucial en la lucha para evitar un cambio climático peligroso. Pero, no sólo eso, porque las medidas para gestionar el carbono en los ecosistemas ofrecen grandes beneficios potenciales para la biodiversidad y la fertilidad del suelo. No debemos perder esta oportunidad de contribuir a la consecución de tantos objetivos ambientales importantes.

GLOSARIO

Acidificación del océano

Disminución del pH del agua de mar por efecto de la incorporación de dióxido de carbono antropogénico (IPCC, 2007c).

Adicionalidad

Se refiere a las emisiones de carbono evitadas que habrían ocurrido en un escenario tendencial (Angelsen, 2008). Se trata de un problema en el sector uso del suelo porque el almacenamiento de carbono en los ecosistemas donde no se habría liberado no puede compensarse como una reducción de emisiones.

Agricultura de precisión

Serie de tecnologías que fomentan una mejor gestión de la producción agrícola al dar cuenta de las variaciones en el desempeño de los cultivos en el espacio. También, se le conoce como “gestión específica de sitio” o “agricultura con uso intensivo de información” (Robertson *et al.*, 2007).

Agricultura sin labranza

Con este sistema, el suelo nunca se voltea y su calidad se mantiene íntegra gracias a la presencia continua de un cultivo de cobertura (FAO, 2008).

Agroforestales, sistemas

Sistemas mixtos de cultivos y árboles que suministran madera, productos forestales no maderables, alimento, combustible, forraje y abrigo (Chopra *et al.*, 2005).

Biocombustible

Cualquier combustible líquido, gaseoso o sólido producido a partir de materia orgánica vegetal o animal. Por ejemplo, el aceite de soja, alcohol de azúcar fermentada, el licor negro proveniente del proceso de fabricación de papel, la madera utilizada como combustible, etcétera. Los combustibles de segunda generación son productos como el etanol y el biodiesel, derivados de biomasa lignocelulósica mediante procesos químicos o biológicos (IPCC, 2007d).

Bioma

Elemento regional de la biosfera claramente diferenciado, constituido generalmente por cierto número de ecosistemas (por ejemplo, los bosques, ríos,

estanques y pantanos de una región dada). Los biomas están caracterizados por determinadas comunidades vegetales y animales típicas (IPCC, 2007c).

CAC – véase Captura y secuestro/almacenamiento del carbono

Captura y secuestro/almacenamiento del carbono (CAC)

Proceso que consiste en la separación del CO₂ de las fuentes industriales y energéticas, su transporte hacia un lugar de almacenamiento y su aislamiento de la atmósfera a largo plazo (IPCC, 2007d).

Ciclo del carbono

Término que describe el flujo de carbono (en forma, por ejemplo, de dióxido de carbono) en la atmósfera, el océano, la biosfera de la Tierra y la litosfera. (IPCC, 2007c).

CMNUCC - véase Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)

Primer tratado internacional en materia de clima. Entró en vigor en 1994 y desde entonces ha sido ratificado por 189 países, entre ellos, Estados Unidos. Más recientemente, varias naciones aprobaron una adición a este tratado: el Protocolo de Kyoto, que contiene medidas más enérgicas (y jurídicamente obligatorias) (Kirby, 2008).

CSC – véase Captura y secuestro/almacenamiento del carbono

Forestación

En el marco del Protocolo de Kyoto, se define como la actividad humana directa dedicada a la conversión de tierras no forestales a tierras permanentemente forestadas (durante un periodo de al menos 50 años) (Angelsen, 2008).

Fuente

Todo proceso, actividad o mecanismo que libera a la atmósfera un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de cualquiera de ellos (IPCC, 2007c).

Fuente de carbono – véase Fuente

Fuga de carbono

En el contexto del cambio climático, la fuga de carbono es el resultado de las intervenciones para reducir las emisiones en un área geográfica (subnacional o nacional), que generan un aumento en las emisiones de otra área. Por ejemplo, si frenar la invasión de los bosques con fines agrícolas en una región tiene como consecuencia la conversión de tierras forestales a agrícolas en otra región, esto se considera una “fuga”. En el contexto del REDD, también se hace referencia a la fuga como “desplazamiento de emisiones” (Angelsen, 2008).

Gases de efecto invernadero (GEI)

Componentes gaseosos de la atmósfera, naturales y antropogénicos, que absorben y emiten radiaciones a longitudes de ondas específicas dentro del espectro de la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. Estas propiedades originan el efecto invernadero. El vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃) son los principales gases de efecto invernadero de la atmósfera terrestre. (IPCC 2007d).

Gobernanza Gestión de los asuntos públicos

El ejercicio de la autoridad política, económica y administrativa en la gestión de los asuntos de un país en todos los niveles. Es un concepto central que incluye a las instituciones, relaciones, procesos y mecanismos complejos mediante los cuales los ciudadanos y los grupos articulan sus intereses, median sus diferencias y ejercen sus obligaciones y derechos legales (UNDP, 1997).

LULUCF – véase Uso del suelo, cambio en el uso del suelo y actividades forestales

MDL – véase Mecanismo para un Desarrollo Limpio

Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL)

Mecanismo incluido en el Protocolo de Kyoto diseñado para ayudar a los países desarrollados (Anexo I) a alcanzar sus objetivos de reducción de emisiones.

El mecanismo reduce las emisiones mediante la instrumentación de proyectos en países en desarrollo (Anexo II), que se le atribuyen a los países del Anexo I porque financian e instrumentan los proyectos. El MDL no sólo tiene por objeto reducir las emisiones o aumentar los sumideros de carbono, sino también contribuir al desarrollo sostenible del país beneficiario (Peskett *et al.*, 2008).

Mitigación

Intervención humana para reducir las fuentes o aumentar los sumideros de gases de efecto invernadero (Department of Climate Change, 2008).

Permanencia

Duración y no reversibilidad de una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Angelsen, 2008). Se trata de un problema en el sector de uso del suelo porque, en teoría, el carbón almacenado y secuestrado en los ecosistemas siempre será vulnerable a la emisión en un futuro indeterminado.

Protocolo de Kyoto

Acuerdo celebrado en consonancia con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Los países que ratifican este protocolo se comprometen a reducir sus emisiones de dióxido de carbono y otros cinco gases de efecto invernadero (GEI), o a participar en el comercio de derechos de emisión, en caso de mantener o aumentar sus emisiones de estos gases. El Protocolo de Kyoto abarca a más de 170 países del mundo, pero sólo 60 por ciento de ellos en lo que respecta a las emisiones de gases de efecto invernadero. A diciembre de 2007, Estados Unidos y Kazajstán son las únicas naciones signatarias que no han ratificado este acuerdo. El primer periodo de compromiso del Protocolo de Kyoto finaliza en 2012; en mayo de 2007 se iniciaron las negociaciones internacionales sobre un siguiente periodo de compromiso (Peskett *et al.*, 2008).

Reforestación

“Actividad humana directa que persigue la conversión de tierras sin cobertura boscosa a tierras con cobertura forestal mediante la plantación, siembra, o promoción e inducción humana de semillas naturales, en tierras que tuvieron bosques pero fueron despojadas de su cobertura forestal”. Para el primer periodo de compromiso del Protocolo de Kyoto, las actividades de reforestación

COLABORADORES Y REVISORES

Autores

Kate Trumper, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Monika Bertzky, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Barney Dickson, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Geertje van der Heijden, NERC Centre for Population Biology, Imperial College London, Reino Unido, y Grantham Institute for Climate Change, Imperial College London, Reino Unido
Martin Jenkins, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Peter Manning, NERC Centre for Population Biology, Imperial College London, Reino Unido, y Grantham Institute for Climate Change, Imperial College London, Reino Unido

Asistencia editorial

Janet Fernandez Skaalvik, UNEP/GRID-Arendal

Diseño

Riccardo Pravettoni, UNEP/GRID-Arendal

Editor de edición en español

Mauro Mansuy López

Formación

UNEP/GRID-Arendal, Noruega

Lista de revisores

Eric R. Anderson, Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe, Ciudad del Saber, Clayton, Panamá
Mario Boccucci, UNEP-DEPI, Nairobi, Kenya
Emil Cherrington, Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe, Ciudad del Saber, Clayton, Panamá
Adrián Alfredo Fernández Bremauntz, Instituto Nacional de Ecología, México D.F., México
Peter Gilruth, UNEP-DEAT, Nairobi, Kenya
Bernal Herrera, The Nature Conservancy, San José, Costa Rica
Hans Joosten, Universidad de Greifswald, Alemania
Thomas Lovejoy, The H. John Heinz III Center for Science, Economics, and the Environment, Washington, D.C., Estados Unidos
Christian Nellemann, UNEP/GRID-Arendal, Noruega
Nick Nuttall, UNEP, Nairobi, Kenya
Dennis Ojima, The H. John Heinz III Center for Science, Economics, and the Environment, Washington, D.C., Estados Unidos
Faizal Parish, Global Environment Centre, Petaling Jaya, Selangor DE, Malasia

se definieron como la reforestación de tierras que no tenían bosques al 31 de diciembre de 1989, pero que tuvieron cobertura boscosa en algún momento en los últimos 50 años (Angelsen, 2008).

Respiración

Proceso en virtud del cual los organismos vivos convierten la materia orgánica en dióxido de carbono, liberando energía y consumiendo oxígeno molecular (IPCC 2007c).

Secuestro

Absorción del dióxido de carbono presente en la atmósfera, ya sea mediante procesos biológicos (por ejemplo, la fotosíntesis en plantas y árboles, véase Secuestro biológico) o procesos geológicos (por ejemplo, acumulación de dióxido de carbono en reservorios subterráneos) (Department of Climate Change, 2008).

Secuestro biológico

Absorción del dióxido de carbono atmosférico mediante procesos biológicos, por ejemplo, la fotosíntesis de plantas y árboles (Department of Climate Change 2008).

Secuestro del carbono

Proceso de aumentar el contenido de carbono de un reservorio distinto de la atmósfera (Chopra *et al.*, 2005).

Sostenibilidad

Característica o estado en el que las necesidades de la población local actual pueden satisfacerse sin poner en riesgo la capacidad de las generaciones o poblaciones futuras, en otros lugares, para satisfacer sus propias necesidades (Chopra *et al.*, 2005)

Sumidero

Todo proceso, actividad o mecanismo que sustrae de la atmósfera un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de cualquier de ellos (IPCC, 2007c).

Sumidero de carbono – véase Sumidero

Tala de impacto reducido

Ejecución intensivamente planificada y cuidadosamente controlada de las operaciones de extracción a fin de reducir al mínimo el impacto en los rodales y suelos forestales, por lo general en la tala selectiva de árboles individuales (FAO, 2004).

Uso del suelo, cambio en el uso del suelo y actividades forestales (LULUCF, por sus siglas en inglés)

Sector de inventarios de gases de efecto invernadero que abarca las emisiones y la absorción de dichos gases derivadas del uso del suelo, el cambio en el uso del suelo y las actividades forestales con una intervención directa del ser humano (UNFCCC, 2009).

Emilio Sempris, Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe, Ciudad del Saber, Clayton, Panamá

Gemma Shepherd, UNEP-DEAT, Nairobi, Kenya
Patrick Smith, USAID, Washington, D.C., Estados Unidos
Diana H. Wall, Colorado State University, Fort Collins, Estados Unidos

Lista de colaboradores

Simon Blyth, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Alison Campbell, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Valerie Kapos, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Jan Kappen, UNEP-DTIE, Nairobi, Kenya
Igor Lysenko, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Monika MacDevette, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Janet Macharia, Oficina Ejecutiva del UNEP, Nairobi, Kenya
Lera Miles, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Christian Nellemann, UNEP/GRID, Arendal, Noruega
Corinna Ravilious, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Jorn Scharlemann, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Mohamed Sessay, UNEP-DFMAM, Nairobi, Kenya
Lucilla Spini, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Kristian Teleki, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Stephen Twomlow, UNEP-DFMAM, Nairobi, Kenya
Terri Young, UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido
Mike Robbins, Overseas Development Group, University of East Anglia, Norwich, Reino Unido

Agradecimientos

Estamos muy agradecidos por las aportaciones y sugerencias que recibimos de los participantes en dos reuniones: el Taller sobre Definición de Alcance del Carbono Terrestre, organizado por el H. John Heinz III Center for Science, Economics, and the Environment en Washington, D.C., los días 28 y 29 de enero de 2009; y la reunión del Grupo Asesor Científico y Tecnológico (GACT) del Fondo para el Medio Ambiente Mundial, organizada por la FAO en Roma, del 28 al 30 de abril. Nos sentimos particularmente agradecidos con Thomas Lovejoy a este respecto. Gracias también a Rody Oñate Zúñiga y otros miembros del personal de la Oficina Regional para América Latina y el Caribe del PNUMA por su apoyo para preparar la edición en español de este informe.

Créditos fotográficos

1iStockphoto/Heather Craig **1i**Stockphoto/Francisco Romero **5i**Stockphoto
8iStockphoto/Claudio Giovanni Colombo **10i**Stockphoto/Ali Ender
Bier **18i**Stockphoto **22i**Stockphoto/Dirk Baltrusch **23i**Stockphoto/Steve
Geer **23i**Stockphoto/Angel Herrero de Frutos **32i**Stockphoto/Phil Augustavo
36iStockphoto/Amanda Langford **38i**Stockphoto/Rey Rojo **39i**Stockphoto/Skip O
Donnell **39i**Stockphoto/Mayumi Terao **41i**Stockphoto **42i**Stockphoto/Francisco
Romero **44i**Topham Picturepoint/UNEP/LeVan Khoa **47i**Stockphoto **50i**Topham
Picturepoint/UNEP/Peter Garside **54i**Stockphoto **55i**Stockphoto/Dean Turner
55iStockphoto/Kelichi Hiki **59i**Stockphoto/Daniel Defabio **60i**Stockphoto/Eric Foltz
76iStockphoto/Carmen Martínez Banús **78i**Stockphoto/RobBroek

REFERENCIAS

Achard, F., Eva, H. D., Mayaux, P., Stibig, H. J., & Belward, A. (2004), Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s, *Global Biogeochemical Cycles*, 18, GB2008.

Amundson, R. (2001), The carbon budget in soils. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29, 535-562.

Angelsen, A. Ed. (2008), Moving ahead with REDD: Issues, options and implications, CIFOR, Bogor, Indonesia.

Baker, T. R., Phillips, O. L., Malhi, Y., Almeida, S., Arroyo, L., Di Fiore, A., Erwin, T., Killeen, T., Laurance, S. G., Laurance, W. F., Lewis, S. L., Lloyd, J., Monteagudo, A., Neill, D., Patiño, S., Pitman, N., Silva, J. N. M., & Vasquez Martinez, R. (2004), Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass, *Global Change Biology*, 10, 545-562.

Baldocchi, D. (2008), TURNER REVIEW No. 15, 'Breathing' of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems, *Australian Journal of Botany*, 56, 1-26.

Balmford, A., Green, R. E., & Scharlemann, J. P. W. (2005), Sparing land for nature: exploring the potential impact of changes in agricultural yield on the area needed for crop production, *Global Change Biology*, 11, 1594-1605.

Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., Palutikof, J. P. (Eds.) (2008), *Climate Change and Water*, Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland.

Benndorf, R., Federici, S., Forner, C., Pena, N., Rametsteiner, E., Sanz, M. J., & Somogyi, Z. (2007), Including land use, land-use change, and forestry in future climate change, agreements: thinking outside the box, *Environmental Science and Policy*, 10, 283-294.

Blakers, M. (2008), *Biocarbon, biodiversity and climate change. A REDD Plus scheme for Australia*, Green Institute, Hobart, Australia.

Bond-Lamberty, B., Peckham, S. D., Ahl, D. E., & Gower, S. T. (2007), Fire as the dominant driver of central Canadian boreal forest carbon balance, *Nature*, 450, 89-93.

Bouillon, S., Borges, A. V., Castañeda-Moya, E., Diele, K., Dittmar, T., Duke, N. C., Kristensen, E., Lee, S. Y., Marchand, C., Middelburg, J. J., Rivera-

Monroy, V. H., Smith III, T. J., & Twilley, R. R. (2008), Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates, *Global Biogeochemical Cycles*, 22, GB2013.

Brown, D., Seymour, F., & Peskett, L. (2008), How do we achieve REDD co-benefits and avoid doing harm? In: *Moving Ahead with REDD: Issues, Options and Implications*. (Ed.A. Angelsen.) CIFOR, Bogor, Indonesia, pp. 107-118.

Bunker, D. E., DeClerck, F., Bradford, J. C., Colwell, R. K., Perfecto, I., Phillips, O. L., Sankaran, M., & Naeem, S. (2005), Species loss and aboveground carbon storage in a tropical forest. *Science*, 310, 1029-1031.

Cagampan, J. P. & Waddington, J. M. (2008), Net ecosystem CO₂ exchange of a cutover peatland rehabilitated with a transplanted acrotelm, *Ecoscience*, 15, 258-267.

Campbell, A, Miles, L., Lysenko, I, Hughes, A, & Gibbs, H. (2008), *Carbon storage in protected areas: technical report*. UNEP, World Conservation Monitoring Centre, Cambridge, UK.

Canadell, J. G. & Raupach, M. R. (2008), Managing forests for climate change mitigation. *Science*, 320, 1456-1457.

Canadell, J. G., Le Quéré, C., Raupach, M. R., Field, C. B., Buitenhuis, E. T., Ciais, P., Conway, T. J., Gillett, N. P., Houghton, R. A., & Marland, G. (2007), Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 18866-18870.

Carbon Dioxide Information Analysis Center (2009). Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA. URL: <http://cdiac.ornl.gov/>. Accessed 03/2009.

CCBA (2008), *Climate, Community & Biodiversity Project Design Standards*, Second Edition. The Climate, Community and Biodiversity Alliance (CCBA), Arlington, USA.

Cermeno, P., Dutkiewicz, S., Harris, R. P., Follows, M., Schofield, O., & Falkowski, P. G. (2009), The role of nutricline depth in regulating the ocean carbon cycle, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 20344-20349.

Chave, J., Olivier, J., Bongers, F., Chatelet, P., Forget, P. M., van der Meer, P., Norden, N., Riera, B., & Charles-Dominique, P. (2008), Above-ground

biomass and productivity in a rain forest of eastern South America, *Journal of Tropical Ecology*, 24, 355-366.

Chicago Climate Exchange (2008), *Soil Carbon Management Offsets*, http://www.chicagoclimatex.com/docs/offsets/CCX_Soil_Carbon_Offsets.pdf, Accessed 2.4, 2009.

Chmura, G. C., Anisfeld, S. C., Cahoon, D. R., & Lynch, J. C. (2003), Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils, *Global Biogeochemical Cycles*, 17, 1111.

Chopra, K., Leemans, R., Kumar, P., & Simons, H. (2005), Ecosystems and Human Well-being: Policy responses, Volume 3, Findings of the Responses Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment, Island Press, Washington, Covelo, London.

Coad, L., Campbell, A, Miles, L., & Humphries, K. (2008), *The Costs and Benefits of Forest Protected Areas for Local Livelihoods: a review of the current literature*, UNEP, World Conservation Monitoring Centre, Cambridge, UK.

Comissao Pastoral da Terra (2008), Online database, URL: <http://www.cptnac.com.br/>. Accessed: 03.2009.

Cowie, A. L., Kirschbaum, M. U. F., & Ward, M. (2007), Options for including all lands in a future greenhouse gas accounting framework. *Environmental Science & Policy*, 10, 306-321.

Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A., & Totterdell, I. J. (2000a), Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model, *Nature*, 408, 184-187.

Cramer, W., Bondeau, A., Woodward, F. I., Prentice, I. C., Betts, R. A., Brovkin, Victor, Cox, P. M., Fisher, V., Foley, J. A., Friend, A. D., Kucharik, C., Lomas, M. R., Ramankutty, N., Sitch, S., Smith, B., White, A., & Young-Molling, C. (2001), Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models, *Global Change Biology*, 7, 375-371.

Davidson, Eric A. & Janssens, I. A. (2006), Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change, *Nature*, 440, 165-173.

De Deyn, G. B., Cornelissen, J. H. C., & Bardgett, R. D. (2008), Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes, *Ecology Letters*, 11, 516-531.

Department of Climate Change (2008), *Carbon Pollution Reduction Scheme. Green Paper*, Department of Climate Change, Commonwealth of Australia, Canberra, Australia.

Duarte, C. M. (2002), The future of seagrass meadows, *Environmental Conservation*, 29, 192-206.

Duarte, C. M., Middelburg, J. J., & Caraco, N. (2005), Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle, *Biogeosciences*, 2, 1-8.

Dutschke, M. (2007), CDM forestry and the ultimate objective of the climate convention, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12, 275-302.

Ebeling, J. & Fehse, J. (2009), *Challenges for a business case for high-biodiversity REDD projects and schemes*, Ecoscurities, Oxford, UK.

Eliasch, J. (2008), Climate Change: Financing Global Forests, The Eliasch Review, The Stationery Office Limited, UK.

Fan, J., Zhong, H., Harris, W., Yu, G., Wang, S., Hu, Z., & Yue, Y. (2008), Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass, *Climatic Change*, 86, 375-396.

FAO (2001), FAO Statistical Database (FAOSTAT), URL: <http://faostat.fao.org/>. Accessed 03/2009.

FAO (2004), *Reduced impact logging in tropical forests. Forest Harvesting and Engineering*, Working Paper No.1, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

FAO (2006), *Global Forest Resources Assessment 2005. Progress towards sustainable forest management*, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy.

FAO (2008), *Climate change and food security: a framework document*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Interdepartmental Working Group on Climate Change, Rome, Italy.

FAO (2009), Enabling agriculture to contribute to climate-change mitigation, Submission to the UNFCCC by the Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO, Rome, Italy.

Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., & Hawthorne, P. (2008), Land clearing and the biofuel carbon debt, *Science*, 319, 1235-1238.

Felzer, B., Reilly, J., Melillo, J., Kicklighter, D., Sarofim, D., Wang, C., Prinn, R., & Zhuang, Q. (2005), Future effects of ozone on carbon sequestration and climate change policy using a global biogeochemical model, *Climatic Change*, 73, 345-373.

Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. (1998), Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components, *Science*, 281, 237-240.

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005), Global Consequences of Land Use, *Science*, 309, 570-574.

Friedlingstein, P., Cox, P., Betts, R., Bopp, L., von Bloh, W., Brovkin, Victor, Cadule, P., Doney, S., Eby, M., Fung, I., Bala, G., John, J., Joos, F., Kato, T., Kawamiya, M., Knorr, W., Lindsay, K., Matthews, H. D., Raddatz, T., Rayner, P., Reick, C., Roeckner, E., Schnitzler, K.-G., Schnur, R., Strassmann, K., Weaver, A. J., Yoshikawa, C., & Zeng, N. (2006), Climate-Carbon Cycle Feedback Analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison, *Journal of Climate*, 19, 3337-3353.

Fung, I. Y., Doney, S. C., Lindsay, K., & John, J. (2005), Evolution of carbon sinks in a changing climate, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 11201-11206.

Garcia-Barrios, L. (2003), Plant-plant interactions in tropical agriculture. In: *Tropical Agroecosystems* (J. H. Vandermeer, Ed.), CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. pp. 11-58.

Geist, H. J. & Lambin, E. F. (2001), *What Drives Tropical Deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence*, LUCC International Project Office, Louvain-la-Neuve, Belgium.

Global Soil Data Task Group (2000), Global Gridded Surfaces of Selected Soil Characteristics (IGBP-DIS), Data set. Available from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA, URL: <http://daac.ornl.gov/SOILS/guides/igbp-surfaces.html>.

Goodale, C. L., Apps, M. L., Birdsey, R. A., Field, C. B., Heath, L. S., Houghton, R. A., Jenkins, J. C., Kohlmaier, G. H., Kurz, W., Liu, S., Nabuurs,

G., Nilson, S., & Shvidenko, A. Z. (2002), Forest carbon sinks in the Northern hemisphere, *Ecological Applications*, 12, 891-899.

Grace, J. (2004), Understanding and managing the global carbon cycle, *Journal of Ecology*, 92, 189-202.

Grace, J., San José, J., Meir, P., Miranda, H. S., & Montes, R. A. (2006), Productivity and carbon fluxes of tropical savannas, *Journal of Biogeography*, 33, 387-400.

Green, R. E., Cornell, S. J., Scharlemann, J. P. W., & Balmford, A. (2005), Farming and the fate of wild nature, *Science* 307, 550-555.

Gruber, N., Friedlingstein, P., Field, C. B., Valentini, R., Heimann, M., Richey, J. E., Romero Lankao, P., Schulze, E. D., & Chen, C. T. A. (2004), The Vulnerability of the Carbon Cycle in the 21st Century: An Assessment of Carbon-Climate-Human Interactions, In: *Global Carbon Cycle, Integrating Human, Climate, and the Natural World* (C. B. Field & M. R. Raupach, Eds.), Island Press, Washington, D.C., pp. 45-76.

Guinotte, J. M. & Fabry, V. J. (2008), Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134 320-342.

Gullison, R. E., Frumhoff, P. C., Canadell, J. G., Field, C. B., Nepstad, D. C., Hayhoe, K., Avissar, R., Curran, L. M., Friedlingstein, P., Jones, C. D., & Nobre, C. (2007), Tropical forests and climate policy, *Science*, 316, 985-986.

Hall-Spencer, J. M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S. M., Rowley, S. J., Tedesco, D., & Buia, M. C. (2008), Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification, *Nature*, 454, 96-99.

Heath, J., Ayres, E., Possell, M., Bardgett, R. D., Black, H. I. J., Grant, H., Ineson, P., & Kerstiens, G. (2005), Rising Atmospheric CO₂ Reduces Sequestration of Root-Derived Soil Carbon, *Science*, 309, 1711-1713.

Henschel, C., Ward, M., Rueter, S., Ashton, R., Bird, N., Frieden, D., Lehtonen, A., Schlamadinger, B., Silvius, M., Tuerk, A., & Zanchi, G. (2008), *Options for improving the treatment of LULUCF in a Copenhagen agreement: forest and wetland degradation, factoring out harvested wood products, and approaches for fuller accounting*, Working papers, August 18, 2008, Climate Strategies, Cambridge, UK.

Hohne, N., Wartmann, S., Herold, A., & Freibauer, A. (2007), The rules for land use, land use change and forestry under the Kyoto Protocol-lessons learned for the future climate negotiations, *Environmental Science and Policy*, 10, 353-369.

Hoojier, A., Silvius, M., Wosten, H., & Page, S. (2006), *Assessment of CO₂ emissions from drained peatlands in SE Asia. A technical report*, Wetlands International, Netherlands.

Houghton, R. A. (2005a), Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance, *Global Change Biology*, 11, 945-958.

Houghton, R. A. (2005b), Tropical Deforestation as a source of greenhouse gas emissions, In: *Tropical Deforestation and Climate Change* (P. Moutinho & S. Schwartzman, Eds.), Amazon Institute for Environmental Research: Pará, Brazil, pp. 13-21.

Houghton, R. A. (2007), Balancing the carbon budget, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35, 313-347.

Huesemann, M. H. (2008), Ocean fertilization and other climate change mitigation strategies: An overview, *Marine Ecology Progress Series*, 364, 243-250.

Huntingford, C., Fisher, R. A., Mercado, L., Booth, B. B. B., Sitch, S., Harris, P. P., Cox, P. M., Jones, C. D., Betts, R. A., Malhi, Y., Harris, G. R., Collins, M., & Moorcroft, P. (2008), Towards quantifying uncertainty in predictions of Amazon 'dieback', *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 363, 1857-1864.

Hutyra, L. R., Munger, J. W., Nobre, C. A., Saleska, S. R., Vieira, S. A., & Wofsky, S. C. (2005), Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazonia, *Geophysical Research Letters*, 32, L24712.

IBGE (2008), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Online database, URL: <http://www.ibge.gov.br/english>, Accessed 03.2008.

IGBP-DIS (2000), *Global Soil Data Products CD-ROM. Global Soil Data Task, International Geosphere-Biosphere Programme, Data and Information System, Potsdam, Germany, Sourced from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA, <http://www.daac.ornl.gov>*.

Iglesias-Rodriguez, M. D., Halloran, P. R., Rickaby, R. E. M., Hall, I. R.,

Colmenero-Hidalgo, E., Gittins, J. R., Green, D. R. H., Tyrrell, T., Gibbs, S. J., Von Dassow, P., Rehm, E., Armbrust, E. V., & Boessenkool, K. P. (2008), Phytoplankton calcification in a high-CO₂ world, *Science*, 320, 336-340.

IPCC (2001), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, & C.A. Johnson, Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.

IPCC (2005), *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H. C., Loos, M., & Meyer, L. A., Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.

IPCC (2007a), *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R., & Meyer, L. A., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (2007b), *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pachauri, R. K. & Reisinger, A., IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

IPCC (2007c), *Cambio Climático 2007: Base de Ciencia Física*, Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller, Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.

IPCC (2007d), *Cambio Climático 2007: Mitigación del Cambio Climático*, Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (B. Metz, O. Davidson, P. Bosch, R. Dave, & L.A. Meyer, Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.

Jackson, R. B., Jobbagy, E. G., Avissar, R., Roy, S. B., Barrett, D. J., Cook, C. W., Farley, K. A., le Maitre, D. C., Mccarl, B. A., & Murray, B. C. (2005), Trading water for carbon with biological sequestration, *Science*, 310, 1944-1947.

Jaenicke, J., Rieley, J. O., Mott, C., Kimman, P., & Siebert, F. (2008), Determination of the amount of carbon stored in Indonesian peatlands, *Geoderma*, 147, 151-158.

Jandl, R., Vesterdal, L., Olsson, M., Bens, O., Badeck, F., & Rock, J. (2007), Carbon sequestration and forest management, *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 2, N017.

Janssens, I. A., Freibauer, A., Ciais, P., Smith, P., Nabuurs, G., Folberth, G., Schlamadinger, B., Hutjes, R. W. A., Ceulemans, R., Schulze, E. D., Valentini, R., & Dolman, A. J. (2003), Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO₂ emissions, *Science*, 300, 1538-1542.

Johansson, T., Malmer, N., Crill, Patrick M., Friborg, T., Akerman, J. H., Mastepanov, M., & Christensen, T. R. (2006), Decadal vegetation changes in a northern peatland, greenhouse gas fluxes and net radiative forcing, *Global Change Biology*, 12, 2352-2369.

Joos, F., Prentice, I. C., Sitch, S., Meyer, R., Hooss, G., Plattner, G.-K., Gerber, S., & Hasselmann, K. (2001), Global warming feedbacks on terrestrial carbon uptake under the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Emission Scenarios, *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 891-907.

Kirby, A. (2008), *Kick the Habit: A UN Guide to Climate Neutrality*, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.

Lal, R. (2004a), Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security, *Science*, 304, 1623-1627.

Lal, R. (2004b), Soil carbon sequestration to mitigate climate change, *Geoderma*, 123, 1-22.

Lal, R. (2007), Soil Science and the Carbon Civilization, *SSSAJ*, 71, 1425-1437.

Lal, R. (2008), Carbon sequestration, *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 363, 815-830.

Le Quéré, C., Roedenbeck, C., Bruitenhuis, E. T., Conway, T. J., Langenfelds, R., Gomez, A., Labuschagne, C., Ramonet, M., Nakazawa, T., Metz, N., Gillett, N., & Heimann, M. (2008), Response to comments on "Saturation of the Southern Ocean CO₂ Sink due to Recent Climate Change", *Science*, 319, 570c.

Le Quéré, Corinne, Rodenbeck, Christian, Buitenhuis, Erik T., Conway, Thomas J., Langenfelds, Ray, Gomez, Antony, Labuschagne, Casper, Ramonet,

Michel, Nakazawa, Takakiyo, Metzl, Nicolas, Gillett, Nathan, & Heimann, Martin (2007), Saturation of the Southern Ocean CO₂ Sink Due to Recent Climate Change, *Science*, 11 36188

Lee, K., Choi, S.-D., Park, G. H., Wanninkhof, R., Peng, T.-H., Key, R. M., Sabine, C. L., Feely, R. A., Bullister, J. L., Millero, F. J., & Kozyr, A. (2003), An updated anthropogenic CO₂ inventory in the Atlantic Ocean, *Global Biogeochemical Cycles*, 17, 27-1-27-17.

Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006), Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 403-427.

Lenton, T. M., Williamson, M. S., Edwards, N. R., Marsh, R., Price, A. R., Ridgwell, A. J., Shepherd, J. G., Cox, S. J., & The GENIE team (2006), Millennial timescale carbon cycle and climate change in an efficient Earth system model, *Climate Dynamics*, 26, 687-711.

Lewis, Simon L., Lopez-Gonzalez, Gabriela, Sonke, Bonaventure, ffum-Baffoe, Kofi, Baker, Timothy R., Ojo, Lucas O., Phillips, Oliver L., Reitsma, Jan M., White, Lee, Comiskey, James A., Marie-Noel, Djuikouo, Ewango, Corneille E. N., Feldpausch, Ted R., Hamilton, Alan C., Gloor, Manuel, Hart, Terese, Hladik, Annette, Lloyd, Jon, Lovett, Jon C., Makana, Jean Remy, Malhi, Yadvinder, Mbago, Frank M., Ndangalasi, Henry J., Peacock, Julie, Peh, Kelvin S. H., Sheil, Douglas, Sunderland, Terry, Swaine, Michael D., Taplin, James, Taylor, David, Thomas, Sean C., Votere, Raymond, & Woll, Hannsjorg (2009), Increasing carbon storage in intact African tropical forests, *Nature*, 457, 1003-1006.

Lu, F., Wang, X., Ouyang, Z., Duan, X., Zheng, H., & Miao, H. (2008), Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland, *Global Change Biology*, 15, 281-305.

Luyssaert, S., Inglima, I., Jung, M., Richardson, A. D., Reichsteins, M., Papale, D., Piao, S. L., Schulzes, E. D., Wingate, L., Matteucci, G., Aragao, L., Aubinet, M., Beers, C., Bernhoffer, C., Black, K. G., Bonal, D., Bonnefond, J. M., Chambers, J., Ciais, P., Cook, B., Davis, K. J., Dolman, A. J., Gielen, B., Goulden, M., Grace, J., Granier, A., Grelle, A., Griffis, T., Grunwald, T., Guidolotti, G., Hanson, P. J., Harding, R., Hollinger, D. Y., Hutya, L. R., Kolar, P., Kruijt, B., Kutsch, W., Lagergren, F., Laurila, T., Law, B. E., Le Maire, G., Lindroth, A., Loustau, D., Malhi, Y., Mateus, J., Migliavacca, M., Misson, L., Montagnani, L., Moncrieff, J., Moors, E., Munger, J. W., Nikinmaa, E., Ollinger, S. V., Pita, G., Rebmann, C., Rouspard, O., Saigusa, N., Sanz, M.

J., Seufert, G., Sierra, C., Smith, M. L., Tang, J., Valentini, R., Vesala, T., & Janssens, I. A. (2007), CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database, *Global Change Biology*, 13, 2509-2537.

Luyssaert, S. E., Schulze, D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., Ciais, P. & Grace, J. (2008), Old-growth forests as global carbon sinks, *Nature*, 455, 213-215.

Mack, M. C., Schuur, E. A. G., Bret-Harte, M. S., Shaver, G. R., & Chapin III, F. S. (2004), Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization, *Nature*, 431, 440-443.

Malhi, Y., Baldocchi, D. D. & Jarvis, P. G. (1999), The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests, *Plant, Cell and Environment*, 22, 715-740.

Malhi, Y. & Grace, J. (2000), Tropical forests and atmospheric carbon dioxide, *Trends in Ecology and Evolution*, 15, 332-337.

Malhi, Y., Wood, D., Baker, T. R., Wright, J., Phillips, O. L., Cochrane, T., Meir, P., Chave, J., Almeida, S., Arroyo, L., Higuichi, N., Killeen, T. J., Laurance, S. G., Laurance, W. F., Lewis, S. L., Monteagudo, A., Neill, D. A., Vargas, P. N., Pitman, N. C. A., Quesada, C. A., Salomao, R., Silva, J. N. M., Lezama, A. T., Terborgh, J., Martinez, R. V., & Vinceti, B. (2006), The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests, *Global Change Biology*, 12, 1107-1138.

Miles, L. & Kapos, V. (2008), Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and forest degradation: Global land-use implications, *Science*, 320, 1454-1455.

Millennium Ecosystem Assessment (2005), *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*, Island Press, Washington, D.C., USA.

Montagnini, F. & Nair, P. K. R. (2004), Carbon sequestration: and underexploited environmental benefit of agroforestry systems, *Agroforestry Systems*, 61, 281-295.

Nair, P. K. R., Kumar, B. M., & Nair, V. D. (2009), Agroforestry as a strategy for carbon sequestration, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172, 10-23.

Neely, C. & Bunning, S. (2008), *Review of Evidence on Dryland Pastoral Systems and Climate Change: Implications and opportunities for mitigation*

and adaptation, FAO – NRL Working Paper, FAO, Rome.

Nellemann, C., Hain, S., & Alder, J. E. (2008), *In Dead Water - Merging of climate change with pollution, over-harvest and infestation in the world's fishing grounds*, United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, Norway.

Nepstad, D. C., Stickler, C. M., Soares-Filho, B., & Merry, F. (2008), Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 1737-1746.

Nepstad, D. C., Tohver, I. M., Ray, David, Moutinho, P., & Cardinot, G. (2007), Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest, *Ecology*, 88, 2259-2269.

Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., D'Amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P., & Kassem, K. R. (2001), *Terrestrial Ecoregions of the World: a new map of life on Earth*, *Bioscience*, 51, 933-938.

Orr, J. C., Fabry, V. J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., Feely, R. A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., Key, R. M., Lindsay, K., Maier-Reimer, Ernst, Matear, R., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R. G., Plattner, G.-K., Rodgers, K. B., Sabine, C. L., Sarmiento, J. L., Schlitzer, R., Slater, R. D., Totterdell, I. J., Weirig, M.-F., Yamanaka, Y., & Yool, A. (2005), Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms, *Nature*, 437, 681-686.

Parasai, R. (2006), Chitwan, Nepal: Will Poor People and Women Benefit Too? In: *Community Forest Management as a Carbon Mitigation Option* (D. Murdiyoso & M. Skutsch, Eds.), CIFOR, Bogor, Indonesia. pp. 35-42.

Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M., Stringer, L., (Eds.) (2008), *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*, Global Environment Centre and Wetlands International, Kuala Lumpur and Wageningen.

Peskett, L., Huberman, D., Bowen-Jones, E., Edwards, G., & Brown J. (2008), Making REDD work for the poor, Prepared on behalf of the Poverty Environment Partnership (PEP).

Phillips, O. L., Lewis, S. L., Baker, T. R., Chao, K. J., & Higuichi, N. (2008),

The changing Amazon forest, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 1819-1827.

Phillips, O. L., Aragao, L. E. O. C., Lewis, S. L., Fisher, J. B., Lloyd, J., Lopez-Gonzalez, G., Malhi, Y., Monteagudo, A., Peacock, J., Quesada, C. A., van der Heijden, G., Almeida, S., Amaral, I., Arroyo, L., Aymard, G., Baker, T. R., Banki, O., Blanc, L., Bonal, D., Brando, P., Chave, J., Alves de Oliveira, A. C., Cardozo, N., D., Czimczik, C., I., Feldpausch, T. R., Freitas, M. A., Gloor, E., Higuchi, N., Jimenez, E., Lloyd, G., Meir, P., Mendoza, C., Morel, A., Neill, D. A., Nepstad, D., Patino, S., Penuela, M. C., Prieto, A., Ramirez, F., Schwarz, M., Silva, J., Silveira, M., Thomas, A. S., ter Steege, H., Stropp, J., Vasquez, R., Zelazowski, P., Davila, E. A., Andelman, S., Andrade, A., Chao, K. J., Erwin, T., Di Fiore, A., Euridice, H., Keeling, H., Killeen, T. J., Laurance, W. F., Cruz, A. P., Pitman, N. C. A., Vargas, P. N., Ramirez-Angulo, H., Rudas, A., Salamao, R., Silva, N., Terborgh, J., & Torres-Lezama, Armando (2009), Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest, *Science*, 323, 1344-1347.

Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Peylin, P., Reichstein, M., Luysaert, S., Margolis, H., Fang, J., Barr, A., Chen, A., Grelle, A., Hollinger, D. Y., Laurila, T., Lindroth, A., Richardson, A. D., & Vesala, T. (2008), Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming, *Nature*, 451, 41-53.

Pinard, M. A. & Cropper, W. P. (2000), Simulated effects of logging on carbon storage in dipterocarp forest, *Journal of Applied Ecology*, 37, 267-283.

Pinard, M. A. & Putz, F. E. (1997), Monitoring carbon sequestration benefits associated with a reduced-impact logging project in Malaysia, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2, 203-215.

Raupach, Michael R., Marland, Gregg, Ciais, Philippe, Le Quéré, Corinne, Canadell, Josep G., Klepper, Gernot, & Field, Christopher B. (2007), Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 10288-10293.

Raven, J. A. & Falkowski, P. G. (1999), Oceanic sinks for atmospheric CO₂, *Plant, Cell and Environment*, 22, 741-755.

Reid, H. & Huq, S. (2005), Climate change - biodiversity and livelihood impacts. In: *Tropical forests and adaptation to climate change. In search of synergies* (C. Robledo, M. Kanninen, & L. Pedroni, Eds.), CIFOR, Bogor, Indonesia, pp. 57-70.

Reid, H. & Swiderska, K. (2008), *Biodiversity, climate change and poverty:*

exploring the links, International Institute for Environment and Development, London, UK.

Ridgwell, A. J., Maslin, M., & Watson, A. J. (2002), Reduced effectiveness of terrestrial carbon sequestration due to an antagonistic response of ocean productivity, *Geophysical Research Letters*, 29, 1095.

Rights and Resources Initiative (2008), *Seeing people through the trees: scaling up efforts to advance rights and address poverty, conflict and climate change*, Rights and Resources Initiative, RRI, Washington, D.C., USA.

Robertson, M., Carberry, P., & Brennan, L. (2007), *The economic benefits of precision agriculture: case studies from Australian grain farms*, CSIRO, Melbourne, Australia.

Robledo, C. & Blaser, J. (2008), Key issues on land use, land use change and forestry (LULUCF) with an emphasis on developing country perspectives, UNDP, An Environment & Energy Group Publication.

Ruesch, A. S. & Gibbs, H. (2008), *New Global Biomass Carbon Map for the Year 2000 Based on IPCC Tier-1 Methodology*, Oak Ridge National Laboratory's Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge, USA, Available online from the Carbon Dioxide Information Analysis Center, URL: <http://cdiac.ornl.gov>.

Running, S. W. (2008), Climate change - Ecosystem disturbance, carbon, and climate, *Science*, 321, 652-653.

Sabine, C. L., Heimann, M., Artaxo, P., Bakker, D. C. E., Chen, C. T. A., Field, C. B., Gruber, N., Le Quéré, C., Prinn, R. G., Richey, J. E., Romero Lankao, P., Sathaye, J. A., & Valentini, R. (2004), Current Status and Past Trends of the Global Carbon Cycle, In: *The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate and the Natural World* (C. B. Field & M. R. Raupach, Eds.), Island Press, Washington, D.C., pp. 17-44.

Schaphoff, S., Lucht, W., Gerten, D., Sitch, S., Cramer, W., & Prentice, I. C. (2006), Terrestrial biosphere carbon storage under alternative climate projections, *Climatic Change*, 74, 97-122.

Schlamadinger, B., Bird, N., Johns, T., Brown, S., Canadell, J., Ciccacese, L., Dutschke, M., Fiedler, J., Fischlin, A., Fearnside, P., Forner, C., Freibauer, A., Frumhoff, P., Hoehne, N., Kirschbaum, M. U. F., Labat, A., Marland, G.,

Michaelowa, A., Montanarella, L., Moutinho, P., Murdiyasar, D., Pena, N., Pingoud, K., Rakonczay, Z., Rametsteiner, E., Rock, J., Sanz, M. J., Schneider, U. A., Shuidenko, A., Skutsch, M., Smith, P., Somogyi, Z., Trines, E., Ward, M., & Yamagata, Y. (2007), A synopsis of land use, land-use change and forestry (LULUCF) under the Kyoto Protocol and Marrakech Accords, *Environmental Science & Policy*, 10, 271-282.

Schlesinger, W. H., Belnap, J., & Marion, G. (2009), On carbon sequestration in desert ecosystems, *Global Change Biology*, 15, online..

Schuur, E. A. G., Bockheim, J., Canadell, J. G., Euskirchen, E., Field, C. B., Goryachkin, S. V., Hagemann, S., Kuhry, P., Lafleur, P. M., Lee, H., Mazhitova, G., Nelson, F. E., Rinke, A., Romanovsky, V. E., Shiklomanov, N., Tarnocai, C., Venevsky, S., Vogel, J. G., & Zimov, S. A. (2008), Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle, *Bioscience*, 58, 701-714.

Scurlock, J. M. O. & Hall, D. O. (1998), The global carbon sink: a grassland perspective, *Global Change Biology*, 4, 229-233.

Shaver, G. R., Billings, W. D., Chapin, F. S., Gilbin, A. E., Nadelhoffer, K. J., Oechel, W. C., & Rastetter, E. B. (1992), Global change and the carbon balance of arctic ecosystems, *Bioscience*, 42, 433-441.

Smith, P. (2004), Engineered biological carbon sinks on land. In: *SCOPE 62: The global carbon cycle: integrating humans, climate and the natural world* (C. B. Field & M. R. Raupach, Eds.), Island Press, Washington, D. C., USA, pp. 479-492.

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., & Sirotenko, O. (2007a), Agriculture. In: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, & L. A. Meyer, Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 497-540.

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., & Towprayoon, S. (2007b), Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 6-28.

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., & Smith, J. (2008), Greenhouse gas mitigation in agriculture, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 789-813.

Spracklen, D., Yaron, G., Singh, T., Righelato, R., & Sweetman, T. (2008), *The root of the matter. Carbon sequestration in forests and peatlands*, Caldecott, B., Policy Exchange, London, UK.

Strassburg, B. (2007), Reducing Emissions from Deforestation: the 'Expected Emissions' approach" (CSERGE Working Paper, January 2007), Paper presented at the 26th Meeting of the Subsidiary Board for Scientific and Technological Advice (SBSTA) of the UNFCCC, Bonn, Germany, 8 May.

Strassburg, B., Turner, K., Fisher, B., Schaeffer, R., & Lovett, A. (2008), An Empirically-Derived Mechanism of Combined Incentives to Reduce Emissions from Deforestation, *Global Environmental Change*, in press.

Sumberg, J. & Okali, C. (1997), *Farmers' experiments: Creating local knowledge*, Lynne Reiner Publishers, Inc., Boulder, U.S.A.

Suratman, M. N. (2008), Carbon Sequestration Potential of Mangroves in South East Asia, In: *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change* (F. Bravo, V. LeMay, R. Jandl, & K. Gadow, Eds.), Springer, Netherlands, pp. 297-315.

Taiyab, N. (2006), *Exploring the market for voluntary carbon offsets*, IIED, London, UK.

TCG (2008), How to Include Terrestrial Carbon in Developing Nations in the Overall Climate Change Solution, The Terrestrial Carbon Group, TCG.

The Royal Society (2005), *Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy document*, 12/05, The Royal Society, London, UK.

UNDP (1997), Governance for sustainable human development. A UNDP policy document, United Nations Development Programme, UNDP, New York, USA.

UNEP-WCMC (2008), *Carbon and biodiversity: a demonstration atlas*.

Kapos, V., Ravilious, C., Campbell, A., Dickson, B., Gibbs, H., Hansen, M., Lysenko, I., Miles, L., Price, J., Scharlemann, J. P. W., & Trumper, K., UNEP-WCMC, Cambridge, UK.

UNFCCC (2009), *Glossary of climate change acronyms*, URL http://unfccc.int/essential_background/glossary/items/3666.php, Accessed 02.04.2009.

Uryu, Y., Mott, C., Foad, N., Yulianto, K., Budiman, A., Setiabudi, Takakai, F., Sunarto, Purastuti, E., Fadhli, N., Hutajulu, C. M. B., Jaenicke, J., Hatano, R., Siegert, F., & Stuwe, M. (2008), *Deforestation, Forest Degradation, Biodiversity Loss and CO₂ Emissions in Riau, Sumatra, Indonesia*, WWF Indonesia Technical Report, Jakarta, Indonesia, 74 pp.

Verchot, L. V., Mackensen, J., Kandji, S., Noordwijk, M., Tomich, T., Ong, Chin, Albrecht, A., Bantilan, C., Anupama, K., V, & Palm, C. (2005), Opportunities for linking adaptation and mitigation in agroforestry systems, *Tropical forests and adaptation to climate change: in search of synergies. Adaptation to climate change, sustainable livelihoods and biological diversity*, Turrialba, Costa Rica, March 2004. 103-121.

Verwer, C., van der Meer, & Nabuurs, G.-J. (2008), *Review of carbon flux estimates and other greenhouse gas emissions from oil palm cultivation on*

tropical peatlands - identifying gaps in knowledge, Alterra Report 1741, Wageningen, Netherlands.

Vuichard, N., Ciais, P., Beileli, L., Smith, P., & Valentini, R. (2009), Carbon sequestration due to the abandonment of agriculture in the former USSR since 1990, *Global Biogeochemical Cycles*, 22, GB4018.

White, A., Cannell, M. G. R., & Friend, A. D. (2000), CO₂ stabilization, climate change and the terrestrial carbon sink, *Global Change Biology*, 6, 817-833.

Wohlfahrt, G., Fenstermaker, L. F., & Arnone, J. A. (2008), Large annual net ecosystem CO₂ uptake of a Mojave Desert ecosystem, *Global Change Biology*, 14, 1475-1487.

Woodward, F. I., Lomas, M. R., & Kelly, C. K. (2004), Global climate and the distribution of plant biomes, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 359, 1465-1476.

Yin, J. P., Wang, Y. S., Xu, J. R., & Sun, S. (2006), Advances of studies on marine carbon cycle, *Acta Ecologica Sinica*, 26, 566-575.

