

SISTEMAS DE USO DE LA TIERRA EN LOS TRÓPICOS HÚMEDOS Y LA EMISIÓN Y SECUESTRO DE CO₂



Organización
de las
Naciones
Unidas
para la
Agricultura
y la
Alimentación

**SISTEMAS DE USO DE LA TIERRA
EN LOS TRÓPICOS HÚMEDOS
Y LA EMISIÓN Y SECUESTRO DE CO₂**

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

ISBN 92-5-304412-8

Reservados todos los derechos. No se podrá reproducir ninguna parte de esta publicación, ni almacenarla en un sistema de recuperación de datos o transmitirla en cualquier forma o por cualquier procedimiento (electrónico, mecánico, fotocopia, etc.), sin autorización previa del titular de los derechos de autor. Las peticiones para obtener tal autorización, especificando la extensión de lo que se desea reproducir y el propósito que con ello se persigue, deberán enviarse a la Dirección de Información, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Roma, Italia.

© FAO 2000

Prólogo

La FAO promueve varias acciones que llevan a la promoción de sistemas de uso y de prácticas de manejo de la tierra en distintas escalas espaciales y temporales, que proporcionan ganancias económicas para aliviar la pobreza y fortalecer la seguridad alimentaria y al mismo tiempo dan beneficios ambientales.

La prevención de la degradación de la tierra, el mejoramiento de la fertilidad de los suelos, el fortalecimiento del secuestro de carbono y la conservación de la biodiversidad por medio del cambio del uso y del manejo sostenible de la tierra son temas prioritarios para la FAO en América Latina y el Caribe.

Este documento intenta evaluar el potencial de los recursos de los sistemas de producción en los trópicos húmedos para el secuestro de carbono (C) atmosférico. El objetivo de esta evaluación es identificar y promover sistemas que tengan un potencial considerable de secuestro de C, tales como la restauración de los bosques secundarios y de las áreas de pasturas degradadas. También se analizan otros sistemas de producción, pero su potencial y contribución al secuestro de C es tema de controversia y especulación. Es posible que los bosques primarios no intervenidos además de ser depósitos de C sean también sumideros de C atmosférico y por eso es importante protegerlos y preservarlos.

Esta evaluación y promoción de sistemas de uso y prácticas de mejoramiento de la tierra deben resultar en claros beneficios de orden social, económico y ambiental, es decir una mayor biodiversidad, mejor conservación y manejo del ambiente y mas secuestro de carbono. Con estas acciones se pretende contribuir a establecer guías y procedimientos para apoyar los esfuerzos de los países amazónicos en la asimilación y evaluación de la situación actual de la tierra y de sus recursos y manejo en relación a la mitigación de la pobreza, la seguridad alimentaria, el secuestro del carbono, la biodiversidad y la degradación y conservación de la tierra, dentro de sus jurisdicciones y territorios; esto está dirigido a producir alternativas de escenarios de uso de la tierra, indicando posibilidades reales para la ejecución de cambios de uso de la tierra que puedan optimizar los múltiples objetivos de los usuarios de la tierra, locales y globales.

El propósito de este documento es de contribuir a la formulación de una estrategia para la valoración de sistemas de uso de tierras amazónicas, a partir de los estudios de secuestro de carbono (C) de la atmósfera por medio de la regeneración natural e inducida.

Agradecimientos

Esta publicación es el resultado de una carta de acuerdo firmada por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) con la FAO. El CIAT, a su vez, contrató al Sr. Myles J. Fisher para escribir el presente manuscrito, bajo la coordinación del Sr. Víctor Palma, Asesor Técnico Principal del Proyecto FAO GCP/RLA/128/NET y de la Sra. Sophie Grouwels, Profesional Asociada del mismo Proyecto.

En la revisión de este documento participaron los señores P. Koohafkan y José Benites del Servicio de Manejo de Tierras y Nutrición de Plantas de la FAO, así como los señores Robert Brinkman y Cadmo Rosell, consultores de la FAO.

Se agradece a todas aquellas personas que proporcionaron al Sr. Fisher su valiosa colaboración y que compartieron su conocimiento y considerable experiencia sobre conceptos, estrategias y tecnologías necesarias para la prevención de la degradación de la tierra, el mejoramiento de la fertilidad de los suelos, el fortalecimiento del secuestro del carbono y la conservación de la biodiversidad por medio del cambio de uso y del manejo sostenible de la tierra de la región Amazónica.

Se extiende un agradecimiento especial al Sr. Riccardo Libori por editar las figuras del manuscrito y a la Sra. Lynette Chalk por la eficiente preparación del documento.

Resumen ejecutivo

En la discusión que sigue, se dará importancia al objetivo principal de este estudio: evaluar el potencial de los recursos de los sistemas de producción de los trópicos húmedos para el secuestro de carbono (C) atmosférico. Como el mayor potencial recae en la regeneración de los bosques secundarios, se les dará una mayor importancia, aunque los pastos bien manejados también tienen un potencial considerable. También se analizan otros sistemas de producción, pero su potencial y contribución al secuestro de C es tema de controversia y especulación. Es posible que los bosques primarios no intervenidos sean sumideros de C atmosférico y por eso es importante protegerlos y preservarlos. Si bien no es posible indicar claramente aún cuáles son las interacciones entre los aspectos, políticos, socioeconómicos y de seguridad de los diversos países que participan de los beneficios de los trópicos húmedos.

La conversión - actual y anterior - de las tierras de los trópicos húmedos a la agricultura y a la producción ganadera, es una importante fuente de C atmosférico que ha tenido el apoyo de decisiones políticas. El propósito de este documento no es el de indicar cómo puede ser secuestrado el C atmosférico. En ningún caso, un ecosistema tan complejo tiene posibilidades de ser un sumidero neto de C atmosférico y al mismo tiempo una fuente neta. Para que actúe como un sumidero, debe detenerse la destrucción actual de los bosques y dar vía a una reforestación activa. Esto es un componente clave de la estrategia presentada.

EL CICLO DEL C ATMOSFÉRICO

El C es la unidad principal de la vida en este planeta y su ciclo es fundamental para el desarrollo de todos los organismos. El C se acumula en compartimientos llamados depósitos y circula activamente entre ellos. Entre esos depósitos, los océanos son los que almacenan la mayor cantidad (38.000 Gt [1 Gt = mil millones de toneladas]), seguido por el suelo (1500 Gt), la atmósfera (750 Gt) y las plantas (560 Gt).

Los océanos, las plantas y el suelo intercambian CO₂ con la atmósfera. Cualquier desequilibrio entre los flujos de entrada y salida se refleja en un cambio en la concentración del CO₂ en la atmósfera. La absorción de CO₂ atmosférico por las plantas (120 Gt año⁻¹) a través de la fotosíntesis está en equilibrio con la respiración de las plantas y del suelo (aproximadamente 60 Gt año⁻¹ cada uno). En 1990, el uso de combustibles fósiles liberó 5 Gt año⁻¹ (más de 6 Gt año⁻¹ actualmente) y la destrucción de la vegetación, principalmente por la conversión de las tierras a agricultura en los trópicos, algo más de 2 Gt año⁻¹. Los océanos tienen una absorción aproximada de 2 Gt año⁻¹, por lo tanto hay un desequilibrio de aproximadamente 5 Gt año⁻¹ a la atmósfera. La concentración de CO₂ en la atmósfera aumentó de 250 partes por millón por volumen (ppmv) en tiempos pre-industriales, a más de 360 ppmv en la actualidad. Sin embargo, la concentración de CO₂ en la atmósfera no está aumentando como muestra ese desequilibrio, por lo que se cree que hay un sumidero terrestre, aunque no se sabe cuál es ni dónde está.

Si la concentración de CO₂ en la atmósfera continúa creciendo, habrá un aumento de la temperatura terrestre, lo que se conoce como “el efecto invernadero.” Aunque todavía se debaten cuáles serán sus efectos, es evidente que afectarán los cambios climáticos.

Actividades internacionales relevantes al secuestro del C

El primer movimiento que consideró este aspecto se llevó a cabo en la Conferencia sobre el Desarrollo Humano, en Estocolmo (1972). El logro más importante de la Conferencia fue la Declaración de Estocolmo, para “inspirar y guiar a los pueblos del mundo en la preservación y mejoramiento del ambiente humano”.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambios Climáticos (CMNUCC) fue adoptada por la Asamblea General de la ONU el 9 de mayo de 1992 y se expuso para su ratificación en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD) en junio de 1992. La Convención tuvo fuerza jurídica obligatoria el 21 de marzo de 1994 y, hasta la fecha, ha sido ratificada por 176 países.

La CNUMAD se realizó en Río de Janeiro en junio de 1992, con la participación de 178 países y la asistencia de más de 100 Jefes de Estado y de Gobierno. Cinco documentos fueron aprobados por consenso en la CNUMAD, reflejando un compromiso político. De los cinco, tres son relevantes al tratamiento y estudio de la temática de bosques y el desarrollo sostenible:

- La Declaración de Río de Janeiro sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo,
- La Declaración Autorizada (también llamada la Declaración de Principios de Bosques), y
- El Capítulo 11 de la Agenda 21 “La Lucha contra la Deforestación”.

La Declaración Autorizada es “de principios para un consenso mundial respecto al manejo, conservación y desarrollo de los bosques de todo tipo.”

Ninguno de estos tres instrumentos tiene fuerza jurídica y por eso pueden ser vistos como tentativas más que como compromisos firmados para políticas específicas. La Declaración de Río no menciona el secuestro de C. En la Declaración Autorizada se mencionan los “sumideros y depósitos de carbono” como un “producto o servicio” de los bosques. En el Capítulo 11 hay algunas propuestas específicas: “teniendo en cuenta la función de los bosques como depósitos y sumideros de carbono en el plano nacional”, “iniciar estudios a fondo sobre el ciclo del C en relación con diferentes tipos de bosques” y “coordinar las investigaciones regionales y subregionales sobre la absorción del C”.

La CMNUCC se aplica a los países desarrollados junto con “países que están en proceso de transición a una economía de mercado”. La CMNUCC autoriza a las Conferencias de las Partes (COP) como la organización para tomar las decisiones y para que los países cumplan sus compromisos bajo la CMNUCC.

En la COP-3 en Kyoto, Japón en 1997, se adoptó el Protocolo de Kyoto. El Protocolo estableció objetivos específicos que deben ser logrados por los países adherentes a la CMNUCC, en términos de sus emisiones con base a los niveles en 1990. También, en el Artículo 6, definió lo que se conoce como los “Bosques de Kyoto” y la Implementación Conjunta (IC) y, en el Artículo 12, propuso un Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Los Bosques de Kyoto son sólo sumideros y fuentes terrestres de C atmosférico que se utilizan en el balance de un país, y están estrictamente “limitados a la forestación, reforestación y deforestación, desde 1990, calculadas como variaciones verificables del C almacenado en cada período de compromiso” (párrafo 2 del Artículo 3 del Protocolo). Aparte de los bosques, se excluyen otros tipos de sumideros, como los suelos en otras

áreas. Obviamente también se excluyen todos los bosques primarios de la Cuenca Amazónica, porque ya existían en 1990.

Los compromisos adquiridos por los países de la CMNUCC fueron, principalmente, reducir, entre 92 y 95%, las emisiones del año base (1990). El primer período para cumplir los compromisos se estableció entre los años 2008 y 2012. Durante ese período, los países de la CMNUCC serán legalmente obligados a cumplir sus compromisos, aunque los mecanismos para establecer las sanciones descritas en el Protocolo (Artículo 18) no han sido establecidos.

Tanto la IC como el MDL permiten a los países llevar a cabo actividades fuera de sus fronteras para mejorar los sumideros de C o disminuir las emisiones y así ganar créditos para cumplir sus compromisos. La diferencia esencial es que la IC es para actividades que se lleven a cabo entre dos países de la Convención, mientras el MDL es un acuerdo bilateral entre un país de la CMNUCC y un país fuera de la CMNUCC. Ambos son similares a los mecanismos de las Actividades de Implementación Conjunta (AIC) de la llamada Fase Piloto, establecida por el COP-1 como parte del Mandato de Berlín, con la excepción de que con la AIC, los países no reciben ningún crédito por cualquier reducción en las emisiones que ellos logren.

En resumen, los mecanismos por los cuales ocurrirá la comercialización de los créditos (o servicios ecológicos) todavía no están definidos. Cuando los créditos comiencen acumularse en el primer período de compromisos (2008 – 2012) y cuando el período de los compromisos se acerque, habrá una demanda por créditos y su precio deberá aumentar siguiendo las fuerzas del mercado normal.

La Cuenca Amazónica, el área de trópicos húmedos más extensa del mundo

El área de la Cuenca Amazónica cubre aproximadamente 8×10^6 km². Cochrane *et al.* (1984) incluyen $4,7 \times 10^6$ km² de la Cuenca Amazónica en el inventario de las tierras de América del Sur tropical. Describieron un total de 213 sistemas de tierra. Además, 60 sistemas de bosque, que están en la Cuenca del Amazonas, no fueron incluidos, ni tampoco Guyana ni Suriname. Por lo tanto debe de llevarse a cabo un estudio complementario para corregir esto.

Los suelos de la Amazonia son principalmente Ferralsoles y Acrisoles con un área menor de Luvisoles. Los suelos tienen una buena estructura física, pero son químicamente infértiles y ácidos y tienen un alto nivel de saturación de aluminio. Los suelos, principalmente en las riberas de los ríos, son más fértiles. La mayor parte de la cuenca tiene una topografía plana con muchas áreas mal drenadas. Los suelos de estas áreas pueden tener un potencial para incrementar sus contenidos de C, pero no se cuenta con información al respecto.

La temperatura es uniformemente alta durante todo el año, con una temperatura media superior a 23,5°C. Existen tres rangos de precipitación, lluvias > 1 300 mm y más de 9 meses húmedos, lluvias entre 1061 – 1300 mm y 8 – 9 meses húmedos, y lluvias entre 900 – 1060 mm con 6 – 8 meses húmedos.

En la cuenca hay tres clases de vegetación dominante: a) bosque húmedo tropical, principalmente en el occidente y noroeste de la cuenca; b) bosque tropical semi-siempre verde estacional en la parte centro-sur y oriente; y, c) bosque tropical decíduo, principalmente en el sur. En general los tipos de vegetación coinciden con las clases de precipitación.

En los últimos 25-30 años ha habido un drástico incremento en la población y en la tasa de destrucción de los bosques, como consecuencia de políticas deliberadas, como la construcción de carreteras e incentivos económicos. Actualmente cerca del 10% del área total se clasifica como

intervenida. Las tasas de destrucción parecen haber disminuido a $10.000 \text{ km}^2 \text{ año}^{-1}$ después de haber alcanzado valores de $30\,000 \text{ km}^2 \text{ año}^{-1}$, sólo en Brasil en 1995. Aunque la tasa de destrucción ha disminuido, la Cuenca Amazónica continúa siendo una fuente neta de C atmosférico.

Algunos datos recientes sugieren que el bosque primario en la Cuenca Amazónica es un sumidero de C de $0.71 \pm 0.34 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. No se sabe si estos valores se pueden aplicar a toda la cuenca en general. Por lo tanto, se necesita verificar estos datos con urgencia y así extenderlos para que cubran un rango geográfico más amplio. Si el bosque primario es un sumidero neto, entonces es importante protegerlo contra la destrucción.

Investigaciones internacionales y nacionales

Los bosques amazónicos son el escenario de un número significativo de esfuerzos internacionales de investigación. Estos programas buscan entender el funcionamiento del bosque en términos fisiológicos y ecológicos, como también entender el almacenamiento de C y su ciclo, los principales ciclos biogeoquímicos, patrones meteorológicos y ciclos hidrológicos. Otros esfuerzos buscan entender los patrones de uso de suelo y cómo las decisiones de los pequeños agricultores afectan el suelo. La mayoría de los estudios se llevan a cabo en Brasil, pero también hay estudios en otros países. Dada la naturaleza de las investigaciones en Brasil y su gran escala, se entiende que además las organizaciones regionales podrían hacer una contribución muy importante mediante la coordinación de actividades en los países interesados.

Mediciones de los depósitos de C en los bosques Amazónicos

Las mediciones de C en los depósitos presentan pocos problemas en una área determinada de bosque secundario, a una escala de manejo y como área discreta de una edad más o menos uniforme. Durante muchos años las metodologías han sido investigadas en estudios ecológicos y forestales, así que deben ser aplicadas de una manera rigurosa y sistemática. Las relaciones alométricas, utilizadas para convertir el diámetro de los tallos - a 1.3 m de altura - a peso seco, necesitan ser verificadas para cualquier ecosistema nuevo donde se vayan a aplicar.

La única duda para medir los depósitos de C es la medición en las raíces y suelo en los bosques. Las guías del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) excluyen el C del suelo y las raíces porque la metodología no es confiable. Este punto debe ser considerado, porque el suelo es tanto una fuente principal de C cuando el bosque se convierte a la agricultura, como un sumidero cuando la tierra intervenida se revierte a bosque. Grandes cantidades de C pueden acumularse en los suelos bajo sistemas de pastos con gramíneas introducidas, de raíces profundas. También, los sistemas con un manejo adecuado de suelos, como la labranza mínima o labranza cero y el uso de residuos como cobertura del suelo, pueden acumular C en el suelo.

La mayoría de las mediciones de C en suelo y raíces se restringen a 20 cm y ocasionalmente hasta 50 cm. Las cantidades de C en las raíces y el suelo pueden ser seriamente subestimadas si las mediciones se limitan a poca profundidad en los sistemas tropicales. Las muestras de suelo deben tomarse hasta por lo menos 1 m de profundidad. La medición y certificación de un área grande para confirmar que en realidad está secuestrando C, son difíciles porque la escala es muy amplia y las tasas de acumulación son relativamente pequeñas con relación a la cantidad de C en el sistema. Este problema es comúnmente conocido como “la diferencia pequeña entre dos números grandes.” Las posibles soluciones son aspectos operacionales y no relevantes para este informe. Claramente se necesita más investigación y la construcción de bases de datos que conjuguen los datos existentes de suelos, clima y vegetación en toda la región y permitan el modelaje del ecosistema a un alto nivel de precisión.

Los análisis de laboratorio para C deben hacerse utilizando metodologías estandarizadas para evitar errores sistemáticos y temporales. La metodología mínima debe ser la digestión de refluo para evitar errores cuando se utilizan factores de corrección para datos de diferentes suelos.

Las bases para la estrategia

Las bases propuestas para la formulación de una estrategia que contribuya a la valoración del bosque amazónico, a partir de los estudios de secuestro de C de la atmósfera por la regeneración natural e inducida, tiene los siguientes componentes:

1. *Proteger* el bosque primario no intervenido.
2. *Incrementar* la producción actual en los bosques intervenidos:
 - *integrar* sistemas de cultivos y pastos.
 - *promover* sistemas agroforestales y silvopastoriles productivos.
3. *Promover* la regeneración de bosques secundarios en tierras marginales y degradadas.
4. *Recuperar* tierras abandonadas.
5. *Medir y documentar* las reservas de C en los diferentes sistemas.
6. *Capacitar* programas nacionales para promover el secuestro de C.

En todos los casos, la estrategia debe operar a través de incentivos económicos, donde sea necesario o deseable por instrumentos legales, que busque equidad, que sea técnica y administrativamente correcta y políticamente viable, lo cual permite un secuestro de C atmosférico certificable y verificable. El séptimo componente busca que los países amazónicos trabajen en *colaboración y cooperación*:

7. *Continuar las negociaciones* en los foros internacionales para asegurar términos favorables de los créditos de C tanto en acuerdos bilaterales como en el mercado abierto.

Con relación a lo último, los países interesados deben actuar con firmeza para que en los foros internacionales se incluyan los bosques ya existentes en 1990, como parte de los Bosques de Kyoto.

A pesar de los progresos para la creación de mecanismos para la comercialización de créditos de C, “las modalidades y procedimientos” aún no están definidos. Mientras no se definan, no será posible pronosticar el valor de una tonelada de C acumulado. Así, el objetivo debe ser obtener datos creíbles y verificables de los depósitos de C y su habilidad para acumular C en los sistemas de producción agrícolas, pastoriles y forestales. Con estos datos, estarán en una posición negociadora más fuerte en los foros internacionales para las reglas de la comercialización de créditos de C. El punto crítico para la negociación es la definición de los Bosques de Kyoto, que específicamente sólo incluyen sumideros que acumulan C sobre la superficie de la tierra en sistemas de forestación y reforestación y como fuentes las pérdidas por la deforestación. Todos los otros sumideros terrestres como bosque primario y el suelo quedan excluidos. No hay posibilidades de forestación en la Cuenca Amazónica y por eso la reforestación en bosques secundarios representa la única opción.

La acumulación del carbono atmosférico por bosques secundarios sólo será un producto comercial en el Protocolo si el balance entre el carbono acumulado es mayor que el carbono emitido por la deforestación de los bosques, permitiendo así que todo el bosque funcione como un sumidero. En el mejor de los casos el bosque secundario sólo acumula cerca del 70% del carbono de los bosques primarios en la superficie de la tierra. Para que haya un balance, por cada hectárea destruida se necesita cerca de 1.5 hectáreas de bosque secundario. En la actualidad el balance está fuertemente inclinado en la dirección opuesta.

Para que la Cuenca Amazónica sea un sumidero neto, la tala de bosques debe detenerse. No es suficiente sólo reducir la tasa de destrucción. La regeneración natural, inducida y/o reforzada del bosque secundario debe ser promovida por todos los medios posibles. Si la cuenca amazónica puede jugar un papel importante en el secuestro del C será fundamental que los bosques y los suelos actuales puedan ser considerados en el Protocolo de Kyoto.

Índice

	Página
1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	1
El ciclo del carbono (c) atmosférico	1
Fuentes	2
Sumideros	3
Balance entre fuentes y sumideros y sus consecuencias	13
Caracterización de la cuenca amazónica	15
Geografía	15
Áreas y límites	16
Clima	16
Comunidades de vegetación y sus áreas	17
Geología y suelos	18
Tipos de uso de suelo y sus áreas	19
Pronóstico para el futuro	19
2. DIAGNÓSTICO DE LAS CONTRIBUCIONES AL SECUESTRO DEL C, POR PARTE DE BOSQUES SECUNDARIOS Y GRAMÍNEAS CULTIVADAS	21
Compartimientos de carbono	21
Materia orgánica del suelo (MOS)	22
Propiedades físicas y químicas	22
Controles principales de la formación de la MOS	23
Fracciones de materia orgánica y agregados	29
Retención de carbono en el suelo	29
Posibles contribuciones al secuestro del c atmosférico	30
Bosques primarios	31
3. RESUMEN DE LOS SISTEMAS Y MÉTODOS DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL SECUESTRO DEL C	33
Mediciones directas	33
Relaciones Alométricas	33
Propuesta de WINROCK	34
El Paquete BOTANAL	36
Geoestadística	36
Errores Geográficos	38
El problema de escala – cómo aumentar la escala de lotes experimentales hasta regiones y ecosistemas	38
Mediciones indirectas (modelaje)	38
Modelos matemáticos de simulación	39
Problemas para la estimación de la acumulación de c en el suelo	43
Determinación de la Densidad Aparente	43
Determinación de concentración de C en el laboratorio	43
Problemas de profundidad y escala de tiempo	43
Muestreo y extrapolación	44

	Página
4. ACTIVIDADES SOBRE SECUESTRO DE CARBONO ATMOSFÉRICO EN LA CUENCA AMAZÓNICA	45
Experimento a gran escala en la biosfera – atmósfera en la amazonia (LBA)	45
Antecedentes	45
Resumen del LBA	47
Conclusiones	49
Programa piloto para la conservación del bosque húmedo brasileño	49
Historia del PP-G7	49
Evaluación y Estado del Programa Piloto	49
Duración y financiación del Programa	49
Manejo integrado de los bosques naturales en la amazonia (IBAMA)	49
Estado actual de los proyectos bilaterales asociados	49
El programa de alternativas a tala y quema (ASB)	51
Antecedentes	51
Las metas del Programa ASB	51
La Fase I (1994-95) y la Fase II (1996-98) del Programa ASB	52
Fase III (1999 – 2002) del Programa de Alternativas a Tala y Quema (ASB)	55
Universidad Estatal de Carolina del Norte, Yurimaguas, Perú	57
5. ACUERDOS INTERNACIONALES PARA EL SECUESTRO DE CARBONO EN LOS PAÍSES AMAZÓNICOS	59
Un resumen del desarrollo de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático	59
Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, Estocolmo, 1972	59
Convención sobre Cambios Climáticos	59
La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD)	60
Declaración de Río de Janeiro sobre Medio Ambiente y Desarrollo	61
Declaración autorizada, sin fuerza jurídica obligatoria, de principios para un consenso mundial respecto al manejo, conservación y desarrollo sostenible de los bosques de todo tipo	61
Capítulo 11 "Lucha contra la Deforestación", de la Agenda 21	61
Actividades bajo las conferencias de las partes del CMNUCC	62
COP-1 Conferencia de las Partes 1 Berlín	62
Actividades de Implementación Conjunta (AIC)	62
COP-3 Conferencia de los Partes 3 Kyoto	63
El Protocolo de Kyoto	64
COP-4 Conferencia de las Partes, Buenos Aires, 2 de noviembre a 13 de Noviembre de 1998	66
Criterios a nivel nacional	67
Criterios a nivel de unidad de manejo	67
Servicios a nivel global	67
6. ELABORACIÓN DE UNA ESTRATEGIA PARA LA MEDICIÓN, ANÁLISIS Y NEGOCIACIONES SOBRE SECUESTRO DEL C	69
La estrategia básica	69
Proteger el bosque primario	69
Mejorar los actuales sistemas de producción en áreas de bosques intervenidos	70
Tipos de intervención y su impacto	71
Convencer a los agricultores el cambio de agricultura de tala y quema por sistemas más productivos y sostenibles	71
Promover la integración de los sistemas actuales de cultivos y pastos	72

	Página
La capacidad de los pastos para secuestrar carbono	73
Plantaciones	73
Promover la regeneración de los bosques secundarios en tierras degradadas	73
Restablecer las tierras abandonadas	75
Medir y documentar las reservas de c en diferentes sistemas	75
Crear sistemas de medición	75
Certificación y verificación	76
Algunas consideraciones	76
Sitios seleccionados	76
Intensidad del muestreo	77
Análisis de las posibilidades del comercio de servicios ecológicos	78
Conocimiento de las funciones	78
Capacitación	78
Negociación	78
BIBLIOGRAFÍA	81

Lista de tablas

	Página
1. Total de C en el sistema y cantidades de C aéreo y subterráneo	3
2. Los sitios de las parcelas permanentes de muestreo en Brasil examinados por Phillips <i>et al.</i> (1998) comparados con ubicación y la distancia a la población más cercana	6
3. Rendimiento, aumento neto de C y porcentaje del aumento neto más profundo que la lámina de labranza (20 cm) en pastos introducidos contrastados con la sabana nativa en dos sitios de los llanos orientales de Colombia	10
4. Vegetación y reservas de carbono orgánico del suelo (COS) para diferentes ecosistemas	13
5. Resumen de las fuentes y sumideros, demostrando que el sumidero extraviado, estará en uno o más sumideros terrestres no identificados	14
6. Las áreas de los Bosques Amazónicos por País	16
7. Sistemas de tierra de la cuenca Amazónica, clasificados según sus subregiones climáticas y fisiográficas	17
8. Áreas de las principales clases de vegetación en la Cuenca Amazónica	17
9. Área bruta del área de deforestación en los Estados de la Amazonia Legal del Brasil	19
10. Tasa de aumento de deforestación en los estados de Amazonia Legal del Brasil	20
11. Comparación de las estimaciones de la productividad neta primaria, teniendo en cuenta las pérdidas por mortalidad y producción subterránea a 15 cm de profundidad, con estimaciones considerando solamente los cambios en la biomasa	26
12. Estimaciones de la proporción de raíces, rendimiento de raíces y relación parte subterránea: parte aérea en praderas naturales y en cultivos	26
13. Rangos estimados de la cantidad y tiempo de recambio de varios tipos de MO almacenada en suelos agrícolas	30
14. Ejemplos de tres niveles para el inventario de C	35
15. Reservas de C en los suelos de la Cuenca Amazónica	37
16. Fracciones conceptuales del C del suelo y tiempos promedio de residencia dentro de las fracciones para los tres modelos de C orgánico del suelo	42
17. Asociación gramínea/leguminosas y manejo de pastoreo en un experimento de pastoreo en un Ultisol en Yurimaguas, Perú	57
18. Cambio en la proporción de leguminosas en cinco pastos gramínea/leguminosa bajo pastoreo en un Ultisol en Yurimaguas, Perú.	57
19. Resumen de las estrategias para proteger y/o restaurar el vigor de las tierras sujetas a diferentes usos.	70
20. Tipos de intervención en tierras de bosques y sus influencias en la absorción o pérdida de C corto o largo plazo.	71

Lista de figuras

	Página
1. El ciclo global de C, mostrando las transferencias mayores entre la tierra, el océano y la atmósfera, expresados en Gt C año ⁻¹	1
2. Cambio en biomasa aérea en bosques Amazónicos, 1975-96	4
3. Acumulación de la biomasa en bosques secundarios después de la tala y la quema y el establecimiento de pastos para ganadería	7
4. Absorción de carbono en bosques secundarios después de varios usos de tierra	7
5. Flujos y cantidades promedios de materia seca en una pradera inundable dominada por <i>Echinochloa polystachya</i> en Ilha da Marchantaria, Brasil	9
6. Distribución por profundidad del C orgánico en el suelo bajo pastos introducidos de la gramínea <i>Brachiaria humidicola</i> solo (Bh) y asociada con la leguminosa <i>Arachis pintoi</i> (Ap) contrastado con pasto de la sabana nativa (NS) en un Oxisol franco arcilloso en Carimagua en las llanos orientales de Colombia	9
7. Cambios en el contenido de C en el suelo de pastos de varias edades establecidos después del talado del bosque Fazenda Nova Vida, Rondônia, Brasil	11
8. Datos de la tasa de destrucción de bosques amazónicos en Brasil entre 1978 y 1996	19
9. Factores que controlan el secuestro de carbono en el suelo y los niveles posibles en distintos sistemas de manejo	23
10. Influencia de las prácticas de manejo en los niveles de carbono orgánico en el suelo COS en el tiempo. Las curvas N y M se refieren a la acumulación de C, sucesiones naturales de vegetación y sucesiones manejadas o mejoradas.	24
11. Influencia de la escala de tiempo sobre consideraciones de manejo para secuestro de C en el suelo	25
12. La forma del secuestro de C en el suelo a partir de la formación de complejos órgano-minerales y agregados estables	29
13. La distribución relativa de los principales tipos de suelo en la Cuenca Amazónica	37
14. El cambio de concentración del C en el suelo con profundidad en suelos contrastantes del trópico y subtropical	39
15. Reservas de C en 10 sistemas de tala y quema	53
16. Producción animal durante seis años de pastoreo rotacional de cinco asociaciones de pastos en un Ultisol en Yurimaguas, Perú	58

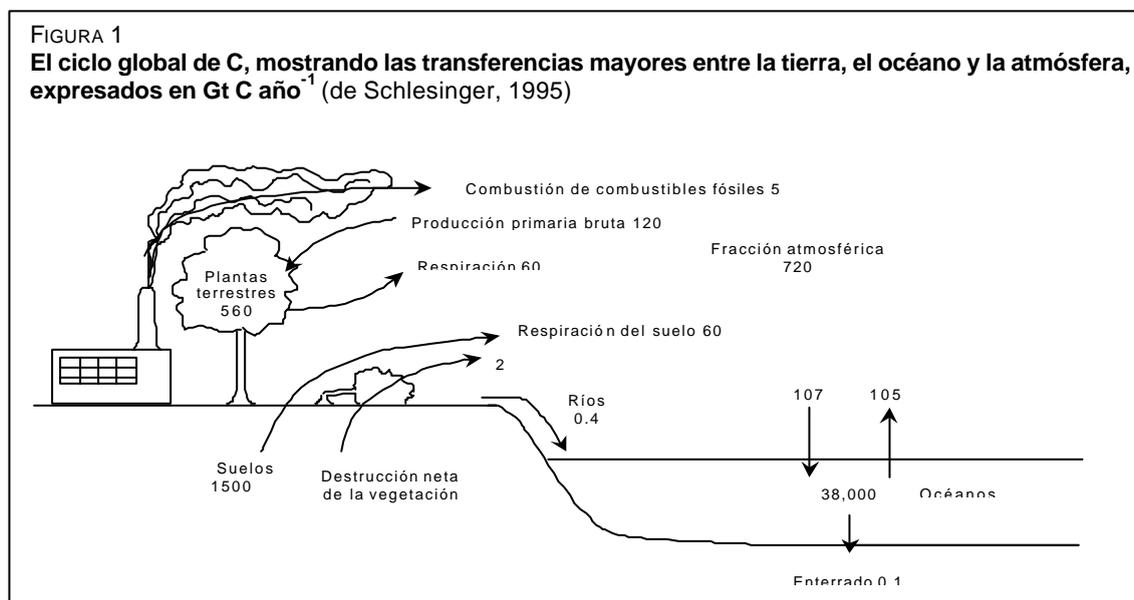
Capítulo 1

Introducción y antecedentes

En la primera parte de este capítulo se presentan las bases generales del ciclo del carbono en la Tierra. Se discuten la naturaleza y las magnitudes de los sumideros y las fuentes de C atmosférico. Por otro lado se enfatizan en las posibilidades para limitar las fuentes agrícolas y aumentar los sumideros. En la segunda parte se discuten los aspectos específicos de la Cuenca Amazónica, su geografía, área, geología y suelos, comunidades vegetales y en especial el uso actual de los suelos y sus tendencias.

EL CICLO DEL CARBONO (C) ATMOSFÉRICO

La Figura 1 muestra un modelo simple del ciclo del C en la Tierra. El intercambio más grande ocurre entre la atmósfera y las plantas, aunque el intercambio con el océano no es mucho menor. El tiempo promedio de residencia de la molécula de CO₂ en la atmósfera, antes de que sea removida por otro sumidero, es de cerca de 3 años.



Aproximadamente la mitad del C fijado por las plantas o la Producción Primaria Bruta (PPB), es respirado por éstas y la Producción Neta Primaria (PNP) en la tierra es solo de 60 Gt¹ C año⁻¹.

¹ En todo este documento la unidad de masa total de carbono está dada en toneladas. Es común ver en la literatura Pentagramos (Pg). 1 Pg = 10¹⁵ g = 10⁹ t = 1 Gigatonelada (Gt) o mil millones de toneladas.

La biomasa terrestre actual es 560 Gt C y su C (en la biomasa viva) tiene una residencia promedio de 9 años.

Las reservas de C orgánico en el suelo (1500 Gt) están en un estado de equilibrio entre las entradas de residuos de plantas a partir de la PNP y las pérdidas, debido a la actividad de los descomponedores. La producción de residuos de vegetales es aproximadamente 55 Gt C año⁻¹ que son PNP – [consumo por herbívoros (3 Gt C año⁻¹) + pérdidas por quemas (aprox. 2 a 5 Gt)]. La respiración del suelo (aprox. 60 Gt C año⁻¹), es un poco mayor que las entradas de los materiales orgánicos muertos al suelo, debido a la porción de respiración de las plantas (raíces) que ocurre subterráneamente.

La liberación de CO₂ a partir de combustibles fósiles (5 Gt C año⁻¹ en 1990, ahora 6 Gt C año⁻¹) es uno de los valores mejor conocidos en el ciclo del C. Si todo el CO₂ se acumula en la atmósfera el incremento anual podría ser de 0.7%. En realidad el incremento atmosférico es aproximadamente 0.4% año⁻¹ ó 1.5 ppm; sólo el 58% de los combustibles fósiles liberados se quedan en la atmósfera.

La absorción neta de CO₂ por el océano está entre 1.7 y 2.8 Gt C año⁻¹ – aproximadamente 40% del C liberado a partir de los combustibles fósiles liberados. La Figura 1 muestra una absorción por parte del océano (107 Gt C año⁻¹) que es algo mayor que el retorno de CO₂ a la atmósfera (105 Gt C año⁻¹).

Muchos ecólogos terrestres creen que hay una liberación significativa de CO₂ a la atmósfera por la destrucción de la vegetación de bosques en favor de la agricultura, especialmente en los trópicos. Asumiendo que las estimaciones de absorción por parte del océano son correctas, los varios intentos para balancear el ciclo del C fallan sino se incluye el incremento substancial en el almacenamiento de C en el suelo.

Fuentes

Existen cuatro reservas principales de C, el océano, los ecosistemas terrestres y las formaciones geológicas que contienen C fósil y mineral. Un cambio en cualquiera de estas reservas tiene un efecto directo en las otras, debido a que están íntimamente ligadas. Las principales fuentes de C son el uso de combustibles fósiles, la deforestación y el uso de la tierra.

Industria y Transporte

El uso de combustibles fósiles en actividades industriales y de transporte liberaron aproximadamente 5 Gt C año⁻¹ en el año 1990. En la actualidad (1999) es más de 6 Gt año⁻¹.

Deforestación y Agricultura

Las actividades agronómicas que liberan C a partir de la vegetación y del suelo a la atmósfera son la deforestación, la quema de la biomasa y la agricultura que incluye el manejo de los residuos de la producción de arroz inundable y la aplicación de fertilizantes. La deforestación de bosques húmedos tropicales y los diferentes usos de la tierra liberan aproximadamente 1.6 Gt C año⁻¹. Las emisiones de C a partir de actividades agrícolas en los trópicos son de aproximadamente 0.6 Gt año⁻¹ (Lal y Logan, 1995).

El avance en la agricultura mecanizada en las últimas décadas del siglo XIX produjo drásticas pérdidas de materia orgánica en los suelos cultivados. Normalmente de 20 a 40% de la materia orgánica nativa del suelo se pierde cuando un suelo virgen es intervenido para convertirlo a la

agricultura. Estas pérdidas son mayores en los primeros años y disminuyen después de aproximadamente 20 años de cultivo.

La quema de la biomasa es otra fuente de CO₂. Esta, al contrario de la fotosíntesis, libera CO₂ y H₂O. A escala global, el C liberado a la atmósfera, como consecuencia de la quema de la biomasa, es substancial (3,49 Gt C año⁻¹; Houghton, 1991) con 3,41 Gt C año⁻¹ en los trópicos (Andreae, 1991). Aún no se conoce el impacto de la quema en la dinámica del C en el suelo y la liberación de CO₂ a la atmósfera. Pocos estudios han tratado de evaluar la dinámica del C en el suelo durante y en diferentes tiempos después de las quemas.

Sumideros

Hay un intercambio entre la atmósfera y los ecosistemas terrestres de aproximadamente 60 Gt en cada dirección, es decir entre la atmósfera y los ecosistemas terrestres por fotosíntesis y entre los ecosistemas terrestres y la atmósfera por los procesos de respiración de las plantas y los microorganismos en la hojarasca y en el suelo.

Debido a que hay un aumento de aproximadamente 1,8 partes por millón (ppm) por año en la concentración de CO₂ en la atmósfera, se calcula un aumento en la cantidad de C de 3,4 Gt año⁻¹. Por modelos matemáticos se sabe que, los océanos absorben aproximadamente 1,7 Gt año⁻¹, y por diferencia hay una cantidad aproximada de 2 Gt año⁻¹ absorbida por los sumideros terrestres. Hasta el momento no se sabe exactamente cuáles son los sumideros terrestres. Un artículo reciente de Phillips *et al.* (1998) estima que los bosques primarios, especialmente en las Américas, han acumulado 0,71 ± 0,34 Gt C año⁻¹ en las décadas recientes. Si se extrapola esta cifra para todos los bosques maduros neotropicales, representan un sumidero de 0,62 ± 0,30 Gt C año⁻¹.

El potencial para el secuestro de C de los bosques secundarios y áreas degradadas reforestadas depende de su manejo. Woomer *et al.* (1999) dieron datos para diferentes tipos de uso del suelo en tres zonas tropicales, bosques en la Amazonia, bosques de *Dipterocarpus* y bosques de Africa occidental (Tabla 1).

TABLA 1

Total de C en el sistema y cantidades de C aéreo y subterráneo (de Woomer et al. 1999). Cifras en paréntesis son errores estándares

Sistema	C Total	C aéreo	C subterráneo
Bosque original	305 (23)	220	85
Bosque manejado	181 (18)	132	49
Talado y en cultivos	52 (7)	12	40
Barbecho de arbustos	85 (9)	19	66
Barbecho de árboles	136 (16)	65	71
Bosque secundario	219 (18)	134	85
Pastos	48 (11)	10	38
Agroforestales jóvenes (5 años)	65 (10)	18	47
Agroforestales maduros (23 años)	130 (11)	75	55

Océanos

El océano absorbe 107 Gt C año⁻¹ el cual es mayor que su retorno de CO₂ a la atmósfera (105 Gt C año⁻¹). Así, la absorción neta de CO₂ por el océano es de 2 Gt C año⁻¹. El flujo neto al océano es dirigido por la muerte de fitoplancton. Para remplazar el CO₂ removido de la superficie del agua, el CO₂ entra al océano como resultado del aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera y se disuelve causando acidificación y disolución de carbonatos marinos.

Sistemas terrestres húmedos

Los terrenos húmedos incluyen pantanos, ciénagas y esteros. Se estima que las tierras húmedas ocupan más del 6% de la superficie de la tierra. La transformación del C en suelos húmedos ocurre principalmente bajo condiciones anaeróbicas o de reducción. Los procesos anaeróbicos importantes son fermentación, metanogénesis y reducción de azufre. El depósito de materia orgánica altamente descompuesta produce un almacenamiento de C en estos ecosistemas, se estima en aproximadamente $29 \text{ g C/m}^2 \text{ año}^{-1}$ (Lal *et al.* 1995). Cerca del 56% de las tierras húmedas del mundo se encuentran en regiones tropicales y subtropicales. Las tierras húmedas son un importante sumidero para el carbono atmosférico.

Los agricultores tradicionalmente han drenado los pantanos con fines agrícolas. Esto permite que la materia orgánica sea aireada y expuesta a los procesos de oxidación y volatilización. Los nutrientes en la materia orgánica se mineralizan y los suelos se vuelven fértiles. Sin embargo, esto tiene un costo. Los suelos drenados se convierten en fuentes de C, a medida que la materia orgánica se oxida, y se vuelven vulnerables a erosión eólica y a las quemadas.

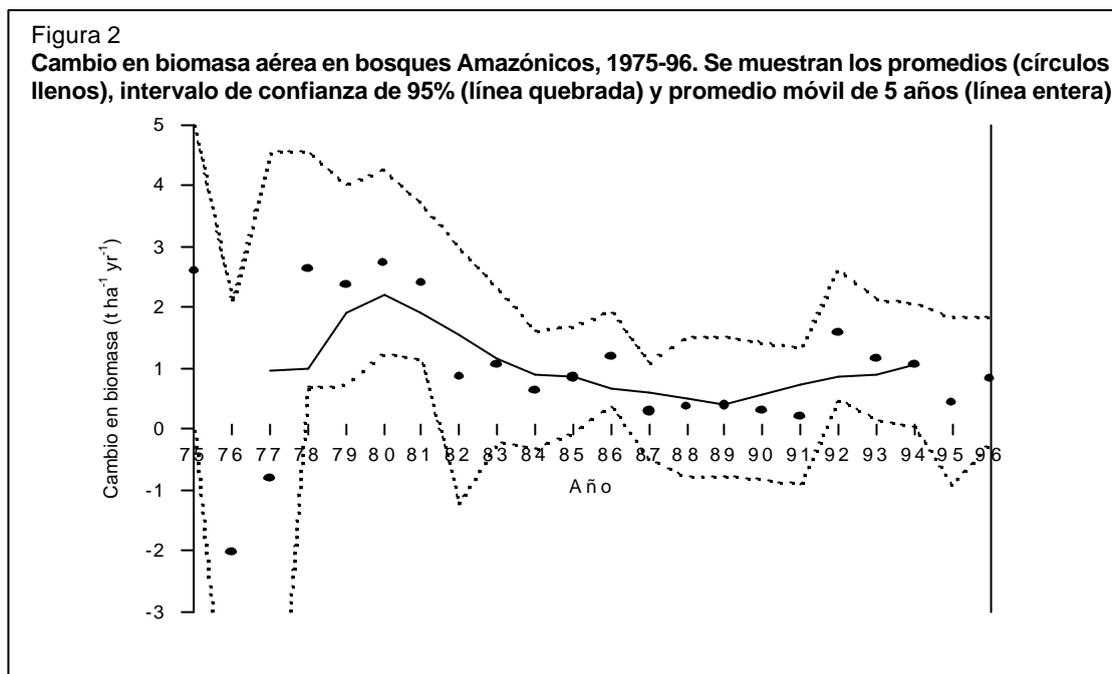
Del área total de la Cuenca Amazónica descrita por Cochrane *et al.* (1984), el 22,8% ($1,23 \times 10^6 \text{ km}^2$) corresponde a tierras húmedas o aéreas mal drenadas o estacionalmente inundadas. Si la tasa de acumulación es la sugerida por Lal *et al.* (1995), estas áreas pueden ser un sumidero con un potencial de absorción del 40% ($0,62 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) del total de la absorción de un bosque maduro según informan Phillips *et al.* (1998).

No se tienen datos sobre el contenido de C de estos suelos, pero es prioritario saber la dinámica del C, especialmente su tasa de acumulación. De esta forma pueden ser incluidos en cualquier posición negociadora para la comercialización de los servicios ecológicos. También es prudente establecer políticas que prevengan su explotación mediante el drenaje para actividades agrícolas.

Bosques primarios

Se cree que los bosques primarios que están en equilibrio con la cantidad de la biomasa es más o menos constante, o sea que, la tasa de mortalidad de las diferentes especies y las tasas a las cuales nuevos individuos se establecen y llegan a la madurez, son estables a largo plazo. Las fluctuaciones estacionales son variaciones a corto plazo (Figura 2). Por lo general, se cree que la Cuenca Amazónica tiene un ambiente continuamente húmedo. La realidad es que hay variaciones mensuales en la precipitación con dos a cuatro y aún a cinco meses en los cuales la evapotranspiración excede la precipitación. La importancia de la estación seca, en estudios sobre la acumulación de C, está en los esquemas de muestreo para determinar la biomasa aérea. Se deben considerar las fluctuaciones en el estado de agua en la vegetación, porque esto se reflejará en el diámetro de los tallos. Si las mediciones se hacen para que coincidan con el estado hidrológico de la vegetación, las mediciones secuenciales resultarán en mayores incrementos de la biomasa y una menor precisión de las estimaciones de la acumulación de C.

El Niño, el fenómeno de oscilación del Pacífico sur que ocurre cada siete años, puede causar fluctuaciones en la precipitación. Este fenómeno puede afectar la cuantificación de la biomasa. También se debe tener en mente cuando se cuantifica el efecto a largo plazo en parcelas permanentes. Los efectos a largo plazo de las fluctuaciones climáticas, como la supuesta "Era de mini hielo" a la mitad de este milenio, no se conocen y aún se discute si esta realmente ocurrió.



Un artículo reciente de Phillips *et al.* (1998) examinó datos de parcelas de muestreo permanente en 40 sitios en la Amazonia: 11 en Brasil, 2 en Ecuador, 2 en la Guyana Francesa, 19 en Perú y 6 en Venezuela. Concluyeron que en todos los sitios, el bosque maduro había ganado en promedio $0,62 \pm 0,37 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y aseguran que este valor es menor que el obtenido con correlaciones en estudios anteriores en Rondônia y Manaus ($1,0$ y $5,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente). Lamentablemente ninguno de los artículos a los que ellos hacen referencia han sido publicados. Esto hace difícil un análisis más detallado sobre las conclusiones de Phillips *et al.* (1998).

La metodología para el estudio de las correlaciones ha mejorado substancialmente, especialmente para estudios de un año de duración, en los últimos veinte años (Verma *et al.* 1995). Sin embargo, se requieren equipos costosos y un soporte elaborado de ingeniería con fuente de energía que no se encuentran en la región. Las plantas portátiles para la generación de energía emiten cantidades considerables de CO₂ y pueden causar problemas a las concentraciones atmosféricas. Esto implica que son necesarias fuentes de energía solar. Por otro lado, el mantenimiento de estos complicados equipos electrónicos es complejo y demanda mucho esfuerzo en el trópico húmedo a largo plazo. Todas estas dificultades pueden sobrellevarse pero a un alto costo.

Phillips *et al.* (1998) aseguran que sus sitios representan la mayoría de las variaciones en los bosques Amazónicos. Los datos para los 11 sitios en Brasil, no son sin embargo, suficientemente confiables (Tabla 2). Nueve de los sitios en Brasil están a una distancia de 60 km. de Manaus y los otros dos están cerca de Santarém y Belém. Hay que recordar que la Amazônia Legal, en Brasil, cubre más de cinco millones de km² y se extiende más allá de 28° longitud y 18° latitud. Los sitios seleccionados por Phillips *et al.* (1998) cubren sólo 11° 43' latitud y 11° 8' longitud. Esto causa dudas de que los sitios sean representativos.

A pesar de lo anterior, Phillips *et al.* (1998) tomaron la decisión de extrapolar sus datos a toda la Amazonia, cuya área estimaron en $7\,116\,280 \text{ km}^2$, incluyendo áreas en Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, cuya área Guyana Francesa, Guyana, Perú, Surinam y Venezuela, clasificadas como

Bosques Húmedos Bajos en el Artículo 112 Forestal de la FAO. Sugirieron que sus datos aplicados a estas áreas, dan una absorción de $0.44 \pm 0.26 \text{ Gt C año}^{-1}$ por parte de un bosque maduro.

TABLA 2

Los sitios de las parcelas permanentes de muestreo en Brasil examinados por Phillips et al. (1998) comparados con ubicación y la distancia a la población más cercana

Ubicación de los sitios	Número de sitios	Latitud y Longitud	Localización de la ciudad más cercana	Diferencia (lat., long.)	Distancia aproximada (km)
Belem	1	1°27'S, 48°27'W	Belem 1°22'S, 48°28'W	0°05', 0°01'	<10
Sitio de BDF	6	2°30'S, 60°00'W	Manaos 3°04'S, 60°02'W	0°34', 0°02'	60
BIONTE	3	2°40'S, 60°10'W	Manaos 3°04'S, 60°02'W	0°24', 0°08'	45
Tapajos	1	2°45'S, 55°00'W	Santarem 2°28'S, 54°46'W	0°17', 0°14'	40

¹ Ubicación de los sitios en un mapa de la región a escala 1: 7 610 000 (National Geographic Society, 1987)

² Calculada mediante la conversión de las diferentes coordenadas a distancia latitudinal y longitudinal como los lados de un triángulo recto para calcular la hipotenusa. Cuatro grados, tanto de latitud como de longitud (resolución de las líneas en el mapa) son aproximadamente 430 km. La distancia física cubierta por un lado de longitud varía con longitud, pero con menos de 4 grados del Ecuador, como son estos datos, los errores por no hacer referencia a la variación, son triviales.

Obviamente un cambio en la definición de sumideros terrestres es necesaria para incluir más elementos que los Bosques de Kyoto.

Es probable que los bosques maduros puedan aumentar en biomasa y así incrementar el almacenamiento de C atmosférico en ellos. Aún si las cantidades anuales son pequeñas, si la absorción ocurre en toda la Cuenca Amazónica debido a que involucra un área grande, la absorción total es globalmente importante. El punto fundamental es el tiempo durante el cual continuará la acumulación. Obviamente habrá un límite extremo que la comunidad pueda soportar, pero no es claro cuál puede ser y cómo será controlado.

Claramente, se necesitan más mediciones a largo plazo en parcelas permanentes, cuidadosamente seleccionadas, para representar la variabilidad de la Cuenca Amazónica.

Bosques secundarios

La tasa a la cual un bosque secundario acumula biomasa aérea - y presumiblemente subterránea también - puede ser substancial y continuar durante muchos años hasta que llegue a parecerse a un bosque primario. La tasa de acumulación de biomasa - y de carbono - dependerá de lo que ocurrió cuando el bosque primario fue talado y de los patrones subsecuentes de uso y manejo. Todo esto determina cual es la condición del suelo cuando se permita el crecimiento de un bosque secundario. Otros factores, como el nivel de las reservas de propágulos de las especies del bosque original (semilla, órganos vegetativos, etc.) y si se lleva a cabo un mejoramiento del bosque original con especies exóticas, influirán en la tasa a la cual un bosque secundario rebrote. En otras palabras, la tasa a la cual el C se acumulará en bosques secundarios depende del nivel del sistema antes de que tenga lugar la regeneración. Los diferentes usos del suelo influyen sobre la tasa a la cual los bosques en regeneración acumulan biomasa - y carbono - (Figura 3 y Figura 4).

FIGURA 3
Acumulación de la biomasa en bosques secundarios después de la tala y la quema y el establecimiento de pastos para ganadería (de Fearnside y Guimarães, 1996)

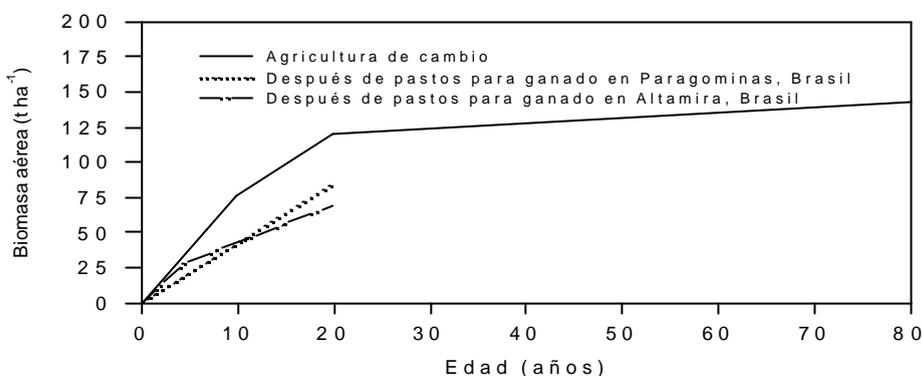
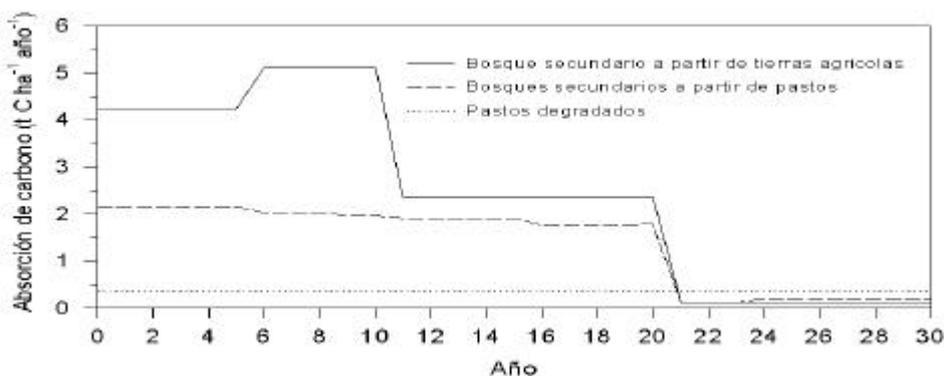


FIGURA 4
Absorción de carbono en bosques secundarios después de varios usos de tierra (de Fearnside y Guimarães, 1996)



Regeneración a corto plazo

La contribución que un bosque secundario hace a un sistema a corto plazo, como el de tala y quema, es la suma de las ganancias de C durante los varios estados de sucesión del bosque secundario - aéreo y subterráneo y en materia orgánica del suelo - menos la suma de las pérdidas de C por la parte aérea y subterránea cuando el bosque se remueve, menos (o más) la cantidad perdida (o adicionada) por el suelo durante la fase de producción. Si la madera del bosque se convierte en productos de larga vida este componente también debe adicionarse a la cantidad acumulada aunque esto raramente ocurre en la práctica.

Fearnside y Guimarães (1996) estimaron la absorción de C por el mosaico de usos del suelo en 410 000 km² en Brasil, para 1990. En el área previamente en bosques fue de 0,7 t C ha⁻¹ año⁻¹ en promedio o 29 x 10⁶ t C. Concluyeron que esto fue casi igual a la cantidad perdida por remoción de los bosques secundarios (27 x 10⁶ t C). El déficit neto de C ha aumentado y continuará haciéndolo debido a que la tala y la quema es el sistema predominante de uso del suelo. El déficit continuará aumentando hasta que todos los bosques sean removidos o hasta que el sitio se estabilice con una cantidad fija de bosques no perturbados.

Regeneración a largo plazo

La única regeneración importante para un secuestro efímero es la regeneración hasta casi un bosque primario seguido por su preservación. Cualquier otra cosa involucra las mismas consideraciones como para el sistema a corto plazo discutido anteriormente. Sin embargo, si la regeneración a largo plazo ocurre, entonces, obviamente, se puede recuperar todo el C que había cuando el bosque fue talado.

En ausencia de incentivos reales, como políticas fiscales convincentes y estrictamente aplicadas es difícil asegurar que la regeneración a largo plazo, como se define aquí, ocurra. No se sabe si las presiones socioeconómicas permiten una regeneración a largo plazo o si un bosque secundario es un componente de un ciclo a corto plazo, como el sistema de tala y quema utilizado en la agricultura de subsistencia. Sin embargo, los bosques secundarios son muy importantes respecto a la definición de los Bosques de Kyoto.

Pastos nativos

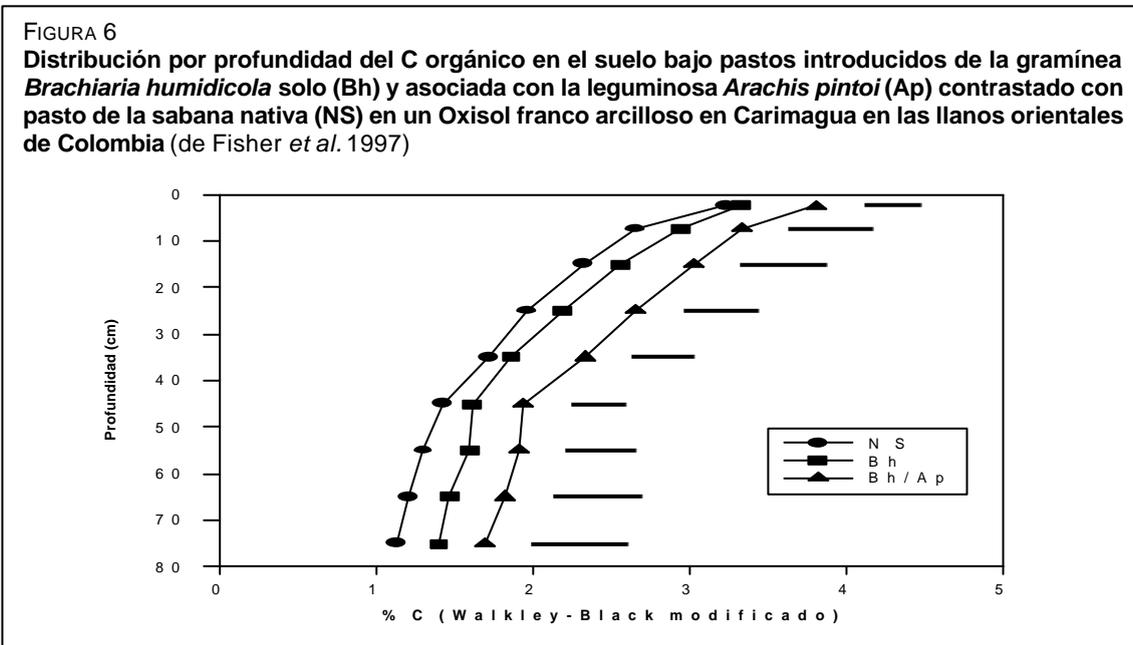
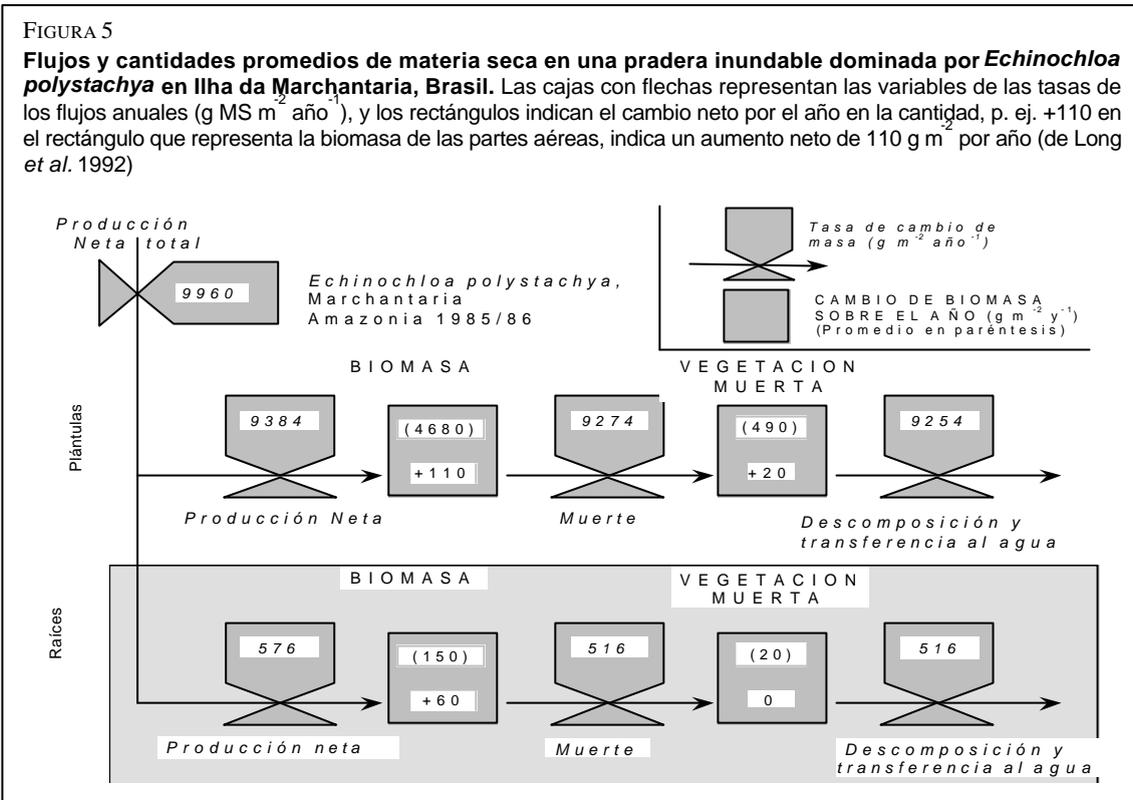
Las praderas nativas de la Cuenca Amazónica, han recibido poca atención y ocupan una proporción pequeña del área total. Long *et al.* (1989, 1992) incluyeron en sus estudios un sitio cerca a Manaus, en las riberas del río Amazonas. A este sitio se le ha dado poca importancia debido a que es diferente a los sitios en Africa, Asia y México, que pueden pensarse como una parte representativa de las diferentes biomasas de praderas en Africa, suroriente de Asia y América Central (ver por ejemplo, Fisher *et al.* 1998). Sin embargo es importante, porque las tasas de PNP fueron astronómicamente altas, teóricamente cercanas al máximo (*producción potencial* en la terminología discutida en el artículo de Ingram y Fernandes, ver sección *Controles principales de la formación de la MOS*).

Long *et al.* (1992) no pudieron separar las pérdidas por descomposición, los fragmentos perdidos en el cauce del río y los sedimentos (Figura 5). Estas pérdidas casi igualaron la producción primaria. Se concluyó, citando a Hedges *et al.* 1986, quienes informan que cerca del 3% de la producción primaria o $30 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ “se incorporó dentro de los sedimentos”. Por otro lado, estimaron que las planicies inundadas ocupaban el 10% del Amazonas ($600\,000 \text{ km}^2$) y que si el 10% de esta área es ocupada por gramíneas similares a *Echinochloa polystachya*, entonces el C secuestrado entre los sedimentos podría ser $0,04 \text{ Gt C año}^{-1}$.

Aunque estos cálculos son especulativos, $0,04 \text{ Gt}$ es equivalente a 40 millones de toneladas. Con base en los valores de Phillips *et al.* (1998) para la acumulación de C en los bosques primarios amazónicos ($0,62 \text{ Gt C año}^{-1}$), la cantidad de C secuestrado por estas praderas es la misma que la acumulada en $64,5 \times 10^6 \text{ ha}$ o cerca del 10% del total de los bosques maduros en tierras bajas.

Pastos introducidos y su manejo

Otra opción para el secuestro de C en los suelos es la introducción de pastos mejorados en ecosistemas de praderas nativas. Fisher *et al.* (1994) informaron que algunas gramíneas africanas introducidas en las sabanas de Colombia, pueden acumular C orgánico en el suelo. Los datos se obtuvieron con *Andropogon gayanus*, *Brachiaria humidicola* y *B. dictyoneura*, y se compararon con sabanas nativas adyacentes, en dos sitios en los Llanos Orientales de Colombia. La Figura 6 muestra la distribución de C con profundidad en el perfil de suelos bajo tres pastos, uno conteniendo la leguminosa forrajera, *Arachis pintoi*. La mayor cantidad de C se midió en la asociación gramínea/ leguminosa.



Al comparar las cantidades de C de la sabana nativa y de los pastos introducidos, se observó que la absorción y el pasto solo, adicionaron 7,0 y 2,6 kg. C m⁻² respectivamente, en un perfil de 80 cm de profundidad. Es importante decir que el 75% del C adicional se encontró por debajo de 20 cm o por debajo de la capa arable (Tabla 3). Fisher *et al.* (1994) concluyeron que ese C debe ser menos vulnerable a la oxidación y pérdida durante la fase de cultivo que pueda seguirse en sistemas de pastos y cultivos integrados.

La cantidad de COS a 80 cm de profundidad en la sabana nativa fue de 19.7 kg. C m⁻² y 26.7 kg. C m⁻² para *B. humidicola* / *A. pintoi* (Tabla 3). Estos valores de COS están en el rango superior para C en suelos de los trópicos incluyendo los Oxisoles que generalmente tienen de 2 a 22 kg. C m⁻² (ver Moraes *et al.* 1995 y sus referencias).

TABLA 3

Rendimiento, aumento neto de C y porcentaje del aumento neto más profundo que la lámina de labranza (20 cm) en pastos introducidos contrastados con la sabana nativa en dos sitios de los llanos orientales de Colombia (de Fisher *et al.* 1997)

Sitio	Finca Matazul				
	Sabana	<i>Andropogon gayanus</i> / <i>Stylosanthes capitata</i>		<i>Brachiaria dictyoneura</i> / <i>Arachis pintoi</i>	
Profundidad	C	C	Aumento	C	Aumento
cm	kg m ⁻²	kg m ⁻²	kg m ⁻² ±SE	kg m ⁻²	kg m ⁻² ±SE
0-20	6,4	7,1	0,7±0,20 **	6,5	0,1±0,15 ns
20-100	12,3	16,6	4,4±0,97 ***	15,0	2,7±0,88 **
Total	18,7	23,7	5,1±1,14 ***	21,5	2,8±1,06 *
% > 20 cm			86,0		95,7
Sitio	Centro Nacional de Investigaciones, Carimagua				
	Sabana	<i>B. humidicola</i> sola		<i>B. humidicola</i> / <i>A. pintoi</i>	
Profundidad	C	C	Aumento	C	Aumento
cm	kg m ⁻²	kg m ⁻²	kg m ⁻² ±SE	kg m ⁻²	kg m ⁻² ±SE
0-20	7,0	7,6	0,6±0,43 ns	8,8	1,8±0,42 **
20-80	12,6	14,7	2,0±0,70 *	17,9	5,3±1,17 ***
Total	19,7	22,3	2,6±0,77 **	26,7	7,0±1,55 ***
% > 20 cm			78,6		74,7

Es común pensar que todos los sistemas de uso del suelo después de la tala tienen un impacto negativo sobre el C del sistema, excepto cuando se deja el rebrote de bosques secundarios a largo plazo. Esto puede ser cierto en algunas áreas con las prácticas actuales, especialmente por nuevos colonos o ganaderos. Sin embargo, hay ejemplos de sistemas sostenibles tanto de cultivos como de pastos en la Cuenca Amazónica. El éxito de todos estos sistemas parece ser la aplicación de tecnologías y prácticas apropiadas de manejo (ver Sección *Universidad Estatal de Carolina del Norte, Yurimaguas, Perú*).

Un ejemplo de éstos es el proyecto de Nestlé en la región pedemontana del Caquetá, en el suroeste de Colombia. Esta área fue colonizada hace 50 años y tiene un sistema de ganadería de doble propósito de producción de leche y carne. El bosque fue talado, pero el problema común fue la baja productividad de los pastos, resultando en baja producción de carne y leche, y baja capacidad de carga.

La compañía Nestlé procesa la leche producida en el Caquetá en una planta construida en Florencia y luego la envía a otras partes de Colombia en forma condensada para su procesamiento y manufacturación. Para afrontar la disminución en la producción de leche, la compañía financió una investigación conjunta y un proyecto de desarrollo entre el Centro Internacional de Agricultura Tropical, la Universidad de la Amazonia en Florencia y CORPOICA, la cual ha tenido resultados positivos.

Con base en la tasa de adopción de la tecnología, se calculó el área total sembrada con *Arachis pintoi* en la región de influencia del Proyecto Nestlé. Los resultados indican que en la actualidad

existen cerca de 3 000 ha plantadas con esta leguminosa, en las 2973 fincas proveedoras de leche. Del área total sembrada, 2610 ha (87%) son asociaciones de *A. pintoi* con gramíneas y el resto de *A. pintoi* sola.

Las distintas especies de gramíneas, parecen tener diferentes tasas de secuestro de C en el suelo, posiblemente debido a las diferencias en la composición de la cobertura. Esto a su vez afecta la tasa y la manera por la cual la hojarasca se descompone. La cobertura de *Brachiaria decumbens* tuvo un promedio de C/N de 88 comparado con 130,1, 126,2 y 117,3 para *Andropogon gayanus*, *B. dictyoneura* y *B. humidicola*, respectivamente (Thomas y Asakawa 1993). Las relaciones de C/N en las raíces van de 159 a 224 (Thomas, Ayarza y Celis, datos no publicados). La poca contribución de *B. decumbens* al secuestro de C en el suelo puede ser característico de la especie – específico como se ha visto en otras especies arbóreas (Sánchez *et al.* 1985).

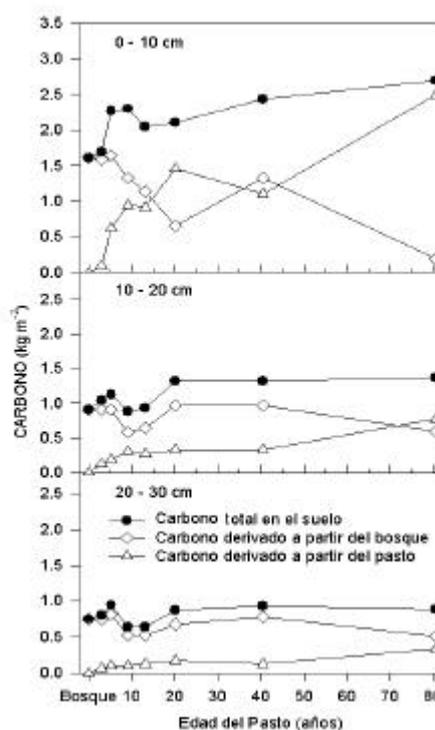
Otros factores, que pueden afectar la tasa de secuestro de C en el suelo, son las diferencias en la profundidad del sistema radicular, el hábito de crecimiento, la PNP, el reciclaje interno que afecta la cantidad y calidad de la materia orgánica que entra al suelo y la micro y macrofauna asociada. A su vez, las diferencias en la cantidad y calidad de MOS y de las propiedades físicas del suelo (porosidad), permiten diferentes microclimas en el suelo. Además, otros factores como el tipo de suelo y el clima pueden tener un papel importante en el secuestro de C. Neill *et al.*

(1997) midieron el C en el suelo en un número de bosques y secuencias cronológicas de pastos en Fazenda Nova Vida en el estado de Rondônia, Brasil. Confirmaron que los pastos son capaces de contribuir a las reservas de C en el suelo (Figura 7). La concentración de C en los primeros 10 cm aumentó de 1,6 kg. m⁻² bajo bosques hasta 2,7 kg. m⁻² bajo pastos. El incremento neto en la capa de 0-30 cm fue un poco más que 1,6 kg. m⁻² que es equivalente a 16 t ha⁻¹. Obviamente estas cantidades están por debajo de las reservas de C del bosque original, pero una vez que el bosque es talado los pastos pueden incrementar la cantidad de C en el suelo.

Existe una cantidad de conceptos errados acerca del papel de los pastos. Algunos autores, (p. ej. Fearnside y Barbosa 1998), consideran los pastos para ganado como sistemas inconvenientes e insostenibles. En este contexto, la sostenibilidad necesita ser examinada a fondo.

Entonces ¿por qué el manejo de los pastos en la Cuenca Amazónica es tan deficiente? Este es un problema claro y debe solucionarse. Las técnicas para mejorar los pastos parecen estar en la adición de N al sistema, aunque deben incluirse P y otros nutrientes.

FIGURA 7
Cambios en el contenido de C en el suelo abierto con pastos de varias edades establecidos después del talado del bosque Fazenda Nova Vida, Rondônia, Brasil (de Neill *et al.* 1997)



En los trópicos, los pastos pueden ser estables y productivos a largo plazo. Hay datos que muestran que la mezcla de pastos y cultivos puede ser lucrativa y productiva a largo plazo, por ejemplo varias décadas (CIAT, 1994). Que los fertilizantes no sean ampliamente usados en el trópico húmedo, no significa que no se puedan emplear o que no se puedan desarrollar sistemas de uso del suelo que no necesiten de ellos. Esto es cierto para sistemas en zonas templadas, entonces ¿por qué debe ser diferente el trópico? Si el sistema de uso del suelo no es económicamente viable en la ausencia de insumos, no funciona de ninguna manera.

La influencia del estado de los nutrientes del suelo en el secuestro de C no se conoce. Sin embargo, cualquier cosa que limite la PPB limitará la acumulación de C en el sistema. Los coeficientes de transferencia entre los compartimentos determinará cuanto C se almacenará a largo plazo.

Otros

Otras estrategias para el secuestro de C en el suelo podrían incluir el mejoramiento en las prácticas de manejo del suelo y de los cultivos. Los sistemas mejorados están diseñados para controlar la erosión, conservar el agua, mejorar el ciclo y minimizar la pérdida de nutrientes, mejorar la fertilidad del suelo y para una producción sostenible.

En zonas templadas, las prácticas agronómicas mejoradas aumentan el C en el suelo aunque no hasta el nivel existente antes de que las tierras se convirtieran en agricultura (Donnigan *et al.* 1997, ver la Sección *Modelo CENTURY* para la descripción del uso de modelo CENTURY y C del suelo). Así, puede pensarse que las mismas tendencias del C en el suelo pueden darse en los trópicos con similares prácticas (labranza mínima, incorporación de los residuos de cosechas). Estas prácticas están siendo adoptadas rápidamente por los agricultores en los Cerrados del Brasil. Dentro de muy poco tiempo habrá datos de las tendencias del C en el suelo a largo plazo.

Cultivos en sistemas sostenibles

La adopción de sistemas de cultivos y el uso de cultivos de cobertura son otras opciones para el secuestro de C en los ecosistemas terrestres. Las rotaciones de cultivos mixtos y el uso de cultivos de cobertura mejoran los contenidos de C orgánico en el suelo, estabilizan su estructura y aumentan su biodiversidad.

Otros Sistemas que contribuyen a la captura de C

Existe un gran potencial para el secuestro de C mediante el uso apropiado de los suelos y prácticas científicas de manejo de los suelos. Hay dos maneras para explorar este potencial:

1. estrategias de manejo y
2. consideraciones políticas.

Existen tres estrategias de manejo. Para el manejo sostenible de los recursos naturales es importante identificar sitios con usos de suelo y sistemas de cultivos específicos. Entre los sistemas más comunes de uso del suelo se incluyen sistemas arables, pastorales, silvoculturales y sus varias combinaciones como por ejemplo, sistemas agropastoriles, agrosilvoculturales, silvopastoriles y agrosilvopastoriles.

El impacto de los diferentes sistemas de usos del suelo está regulado por el manejo que se le da al suelo. Los sistemas de manejo del suelo que tienen un efecto importante en las reservas de C en el suelo, incluyen la labranza mínima, el manejo de los residuos de cosecha, del agua y de la fertilidad del suelo, como también el control de la erosión. Igualmente son importantes el manejo de

las plantas y los animales incluyendo los cultivos de cobertura, los cultivos en rotación y la mezcla con gramíneas con sistemas radiculares profundos, y el manejo de los pastos y de las cargas animales en estos.

La efectividad de las opciones biofísicas del manejo depende de políticas de incentivos, factores económicos, consideraciones ambientales y aspectos éticos. El apoyo institucional es un importante aspecto para mejorar la adopción de sistemas ambientalmente compatibles. La decisión de adoptar un sistema de uso del suelo y un sistema de cultivo está dirigido por factores políticos y socioeconómicos.

Balance entre fuentes y sumideros y sus consecuencias

Perspectiva histórica

La concentración de CO₂ se estima que era aproximadamente de 250 partes por millón en volumen (ppmv) en tiempos medioevales (900-1200 DC) y aproximadamente 280 ppmv de 1300 a 1800 DC. En 1994, la concentración había aumentado a 358 ppmv (Lal *et al.* 1997). Aunque el aumento comenzó con la revolución industrial, la expansión de la agricultura, que comenzó alrededor de 1860, causó un mayor aumento que el uso de combustibles fósiles hasta finales de la década de 1970 (Houghton *et al.* 1983, citado por Lal *et al.* 1997). Los cambios en el uso del suelo a partir de los tiempos pre-agrícolas hasta ahora han demostrado que hay aproximadamente 17,5 millones de km² en tierras cultivadas, del cual 0,5 millones de km² fueron áreas que anteriormente fueron bosques húmedos en el trópico. Las emisiones totales terrestres para el período de 1850 a 1980 han sido dominadas por las emisiones provenientes de la conversión de bosques tropicales siempre verdes y estacionales (ver Tabla 4).

TABLA 4

Vegetación y reservas de carbono orgánico del suelo (COS) para diferentes ecosistemas (corregida por Houghton, 1995)

Ecosistemas	Reserva de Carbono (t ha ⁻¹)			Total C de emisiones 1850-1980 (Gt)
	Vegetación	Suelo	Total	
Bosques tropicales siempre verdes y estacionales	307,6	201,2	508,9	108
Bosques siempre verdes templados, deciduos y boreales	380,3	472,7	853,0	25
Barbechos tropicales y bosques abiertos	87,1	149,5	236,6	16
Praderas y pastos tropicales	15,5	42,8	58,3	16
Bosques templados	25,5	69,3	94,8	1
Praderas y pastos templados	7,3	189,1	196,4	54
Tundra, alpino, desiertos, rocas hielo y arenas	4,2	261,6	265,7	0
Pantanos y esteros	70,0	725,0	795,0	0

La situación corriente

Debido a que hay un aumento de aproximadamente 1.8 partes por millón (ppm) por año en la concentración de CO₂ en la atmósfera, se calcula un aumento en la cantidad de C de 3,4 Gt año⁻¹. Por modelos matemáticos se sabe que, los océanos absorben aproximadamente 1,7 Gt año⁻¹, y por diferencia hay una cantidad aproximada de 2 Gt año⁻¹ absorbida por los sumideros terrestres. Hasta el momento no se sabe exactamente cuáles son los sumideros terrestres (ver Tabla 5).

Pronóstico para el futuro

Durante los últimos 20 años, la concentración atmosférica de CO₂ ha aumentado constantemente. Como se dijo anteriormente, la concentración ha alcanzado 358 ppm en 1994 (Lal *et al.* 1997) y ha ido aumentando 1,5 ppm por año. Aunque los pronósticos de los cambios que traen este aumento son varios, es ampliamente aceptado que el clima cambiará (por ejemplo, con incrementos en la temperatura).

La preocupación de que el incremento en la concentración de CO₂ en la atmósfera pudiera cambiar el clima, hizo que las Naciones Unidas tomaran acción. Debido a que las acciones afectan las políticas del futuro, es apropiado resumirlas brevemente. Las acciones se considerarán con más detalle en el Capítulo 5.

En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente y Desarrollo, en Río de Janeiro en junio de 1992 se adoptaron, entre otros instrumentos, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Todos los instrumentos están relacionados con la Cuenca Amazónica, aunque en el contexto de secuestro de C, la CMNUCC es la más importante.

Para hacer un pronóstico, es necesario entender las principales provisiones de la CMNUCC y las posibilidades de impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero. En el Capítulo 5 se profundiza y hace una discusión más profunda sobre el tema.

El propósito principal de la CMNUCC, como se declara en su Artículo 2, es “lograr la estabilización de la concentración de los gases de invernadero en la atmósfera a un nivel que prevenga las interferencias antropogénicas peligrosas con el sistema climático”.

En el Artículo 3, se definió una serie de principios. La responsabilidad de la protección del sistema climático debe ser equitativa y por esta razón los países desarrollados deben tomar el liderazgo de combatir los cambios climáticos y sus efectos adversos. Se debe dar plena consideración a las necesidades de los países en desarrollo.

Los países deben hacer todo lo posible para enfrentar el problema mediante medidas para anticipar, prevenir o minimizar las causas de los cambios climáticos. Es importante que los pasos que se tomen “comprendan y cubran todas las fuentes y sumideros de los gases de invernadero”. La pregunta de los países que trabajan juntos se considera debidamente: “los esfuerzos... deberán ser llevados a cabo en cooperación”.

Sin embargo, se mantienen los derechos de los países para delinear sus propios esfuerzos. Tienen el derecho al desarrollo sostenible: “las políticas y medidas deben ser apropiadas para las condiciones específicas de cada país y deben integrarse con los programas de desarrollo nacionales”.

TABLA 5

Resumen de las fuentes y sumideros, demostrando que el sumidero extraviado, estará en uno o más sumideros terrestres no identificados (después de Bliss *et al.* 1995)

Reserva	Flujo promedio Gt* de C año
Fuentes	
Combustibles fósiles	5,4 ⁰ 0,5
Deforestación y uso de tierras	1,6 ⁰ 1,0
Total	7,0 ⁰ 102
Sumideros	
Atmósfera	3,2 ⁰ 0,1
Océanos (absorción calculado)	2,0 ⁰ 0,8
Total	5,2 ⁰ 0,8
Diferencia (fuentes – sumideros)	1,8 ⁰ 1,4

La Convención delinea los compromisos que deben ser asumidos por los países (Artículo 4) para desarrollar y periódicamente actualizar los inventarios de las emisiones y sumideros de gases de invernadero y las medidas para reducir las emisiones de gases y aumentar los sumideros. En resumen los países desarrollados se comprometen en reducir sus propias emisiones a porcentajes específicos - emisiones brutas de todas las fuentes menos la absorción por los sumideros - usando como base las emisiones de 1990. Los países en desarrollo se excluyen de estos compromisos. Los países desarrollados deberán financiar las actividades en países en desarrollo, para reducir las emisiones e incrementar los sumideros y así obtener créditos en contra de sus propios compromisos.

La implementación de la Convención, ya firmada por 178 países, es vigilada por las Conferencias de las Partes (COP, Artículo 7). La primera COP se llevó a cabo en Berlín en 1995, y luego en Ginebra (1996), Kyoto (1997) cuando se aprobó el Protocolo de Kyoto. El Protocolo de Kyoto establece los compromisos específicos por parte de los países desarrollados para reducir sus emisiones netas entre los años 2008 y 2012. El protocolo se discute con más detalle en el Capítulo 5, pero el punto importante aquí es que ahora existe un marco legal por el cual los países desarrollados son legalmente obligados a reducir sus emisiones a niveles específicos para una fecha determinada. Sin embargo, los mecanismos por los cuales los proyectos de colaboración o cooperación comienzan a operar, no se han definido todavía.

Si la CMNUCC y el Protocolo de Kyoto son efectivos, las emisiones globales de C del 2012 disminuirán a los niveles de 1990. Todavía se discute sobre el nivel en el cual la concentración de CO₂ en la atmósfera se estabilizará y cuáles son las consecuencias en el clima global. Sin embargo, es claro que la tasa exponencial del incremento de la concentración de CO₂ es insostenible y que las acciones propuestas disminuirán el aumento.

CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA AMAZÓNICA

Geografía

Los límites geográficos de la Amazonia, definida como el área que está dentro de la cuenca hidrológica del Amazonas, incluyen otras unidades fisiográficas, por ejemplo las Guayanas al noroeste de Brasil y las Pampas de Mojos del noroeste de Bolivia (Cochrane *et al.* 1984). El problema de usar una definición geográfica estricta es más compleja a causa de la vegetación y las diferencias fisiográficas. Por ejemplo Cochrane *et al.* (1984) excluye de la Amazonia el sistema de bosque Bc22 de 2 198 800 ha en la unidad fisiográfica de Xavantia, aunque está en la Cuenca Hidrológica del Amazonas y 82% es bosque estacional semi-siempre verde y los Cerrados (sabana cerrada).

Observando los mapas del Informe Cochrane *et al.* (1984, Vol. 2, Parte 1) se aprecia que la Cuenca hidrológica del Amazonas también incluye muchas áreas en su periferia que son montañas o sabanas bien o mal drenadas.

En general hay tres clases principales de vegetación en la Amazonia:

- Bosque húmedo tropical, principalmente en la parte alta (occidental) de la Cuenca en el oeste de Brasil, este de Perú, Ecuador, suroeste de Colombia sureste de Venezuela.
- Bosque estacional semi-siempre verde, principalmente en este y sur del bosque húmedo tropical. La mayor parte de esta clase de vegetación está en Brasil, pero también se encuentra en sureste de Perú, sureste de Venezuela y noreste de Bolivia.

- Existe otra vegetación en áreas predominantemente mal drenadas o estacionalmente inundadas, principalmente entre el Río Solimões y el Río Negro y al norte del Río Negro en el noroeste de Brasil y hay pequeñas áreas en el noroeste de Perú y noroeste de Bolivia.

Áreas y límites

No todas las tierras de los países amazónicos son bosques húmedos; por ejemplo Brasil incluye parte de los Cerrados y Colombia parte de los Llanos Orientales. En Suriname y Venezuela se incluyen tierras que no son físicamente parte de la Cuenca Amazónica. Sin embargo, el Tratado lo permite, diciendo, “El presente Tratado se aplicará en los territorios de las Partes Contratantes en la Cuenca Amazónica, así como también en cualquier territorio de una Parte Contratante que, por sus características geográficas, ecológicas o económicas se considere estrechamente vinculado a la misma¹.”

Según Cochrane *et al.* (1984) la Cuenca Amazónica comprende un total de 213 sistemas de tierras que cubren 4 735 000 km². Otros 65 sistemas de tierras son bosques y están dentro de los afluentes del Amazonas y sus bosques por un total de 5 563 000 km², según un análisis de los sistemas de tierras definidos por Cochrane *et al.* (1984), tanto en el mapa detallado en el Volumen 2 y por datos para cada sistema de individual tierra. Las Guyanas y Suriname no fueron incluidas en el estudio de Cochrane *et al.* (1984), por lo tanto no es posible estimar su área y determinar las estimaciones del área y de las comunidades vegetales en ellos.

Toledo (1997), citando varias fuentes estimó el área en casi 8 x 10⁶ km² (Tabla 6). Phillips *et al.* (1998) estimaron que el área total de la cuenca Amazónica en 7 116 280 km² incluyendo las áreas similares en la Guyana Francesa, Guyana y Suriname. Sin embargo, el área actual y su cobertura vegetación necesita ser reestimada definitivamente.

TABLA 6

Las áreas de los Bosques Amazónicos por País (de Toledo, 1997)

País	Bosque cerrado km ²	Bosque abierto km ²	Total km ²	Virgen km ²	Intervenido km ²
Bolivia	385 000	173 000	558 000	436 000	122 000
Brasil	3 562 800	1 582 000	5 144 800	4 722 800	422 000
Colombia	478 000	53 000	531 000	508 000	23 000
Ecuador	119 000	5 000	124 000	110 000	14 000
Guyana	162 797	2 200	164 997	112 507	52 490
Perú	760 700	13 300	774 000	698 000	76 000
Suriname	143 300	1 700	150 000	145 800	4 200
Venezuela	437 300	36 000	473 307	359 000	114 300
Guyana Francesa	78 320	700	79 020		
Total	6 132 217	1 866 900	7 999 124	7 092 000	827 990

Clima

El clima se describe como ecuatorial con pocos cambios estacionales (Cochrane *et al.* 1984). Dentro de esta región el determinante principal del clima es la depresión atmosférica ecuatorial, la cual sigue el movimiento estacional del sol, pero con una duración de aproximadamente dos meses.

En su posición más al norte, en agosto/septiembre, la depresión ecuatorial se localiza entre 5 y 10° N. En febrero/marzo, está en su posición más al sur entre 0 y 5° S (Cochrane *et al.* 1984). Durante el verano sureño se desarrolla un calentamiento en el sur de Sur América, que al

¹ Artículo II del Tratado: ver el CD-ROM de la SPT o en el enlace <http://www.spt-tca.org>

encontrarse con la depresión ecuatorial causa una gran inestabilidad al oriente de los Andes. Como resultado se presentan lluvias fuertes regionales durante esta época.

Ocasionalmente los vientos de aire polar se mueven hacia el norte durante el verano sureño. Estos vientos son canalizados entre los Andes y el escudo Brasileño, llegando frecuentemente hasta la Cuenca Amazónica y algunas veces hasta la cuenca del Orinoco. Estos cambios fríos normalmente duran de tres a cinco días, aunque pueden durar hasta 15 días en casos excepcionales.

La precipitación sigue el movimiento de la depresión ecuatorial y el calentamiento continental. La Amazonia occidental no tiene una época seca bien definida, si bien la precipitación muestra una distribución bimodal. En la Amazonia oriental se distingue una estación seca con menos tendencia a una distribución bimodal. En la Amazonia suroriental persiste una distribución bimodal y pueden haber veranillos cortos en el medio de la época húmeda (Cochrane *et al.* 1984).

Debido a una baja reflectividad o albedo de su vegetación, la parte alta de la Cuenca Amazónica se comporta climáticamente como una zona marítima mas que como una zona continental. La evapotranspiración a través de la región es mayor de 1300 mm año⁻¹ o sea mas que la de la superficie del océano (Cochrane *et al.* 1984). La distribución climática de las subregiones se muestra en la Tabla 7.

TABLA 7

Sistemas de tierra de la cuenca Amazónica, clasificados según sus subregiones climáticas y fisiográficas (Cochrane *et al.* 1984). Todas las tierras tienen una temperatura mensual media mayor de 23,5^o C

Subregión Climática	Cuenca Amazónica		Brasil		Los Andes		Piedemonte Andino		Guyana		Cuenca del Orinoco		Total
	km ²	No	km ²	No	km ²	No	km ²	No	km ²	No	km ²	No	
a*	1 634	67			11 830	2	103 066	21	80 542	1	29 546	3	1 859 557
b	573				1 768	3	54 761	10	280 126	6	10 514	1	3 274 389
c	2 927	129											
e	221								13 609	2	17 045	2	244 247
o	173 619	17	39 976	2			18 481	1			5 940	1	127 489
			103 068	6			57 515	4					57 515
Total	4 735	213	143 044	8	13 598	5	233 823	36	374 276	9	63 045	7	5 563 198
	412												

a* = Total de la evapotranspiración potencial de la época húmeda > 1300 mm, más de 9 meses húmedos.

b = Total de la evapotranspiración potencial de la época húmeda 1061 – 1300 mm, 8 - 9 meses húmedos.

c = Total de la evapotranspiración potencial de la época húmeda 900 - 1060 mm, 6 - 8 meses húmedos.

e = Total de la evapotranspiración potencial de la época húmeda < 900 mm, < 6 meses húmedos.

o = Otros

Comunidades de vegetación y sus áreas

Existen tres comunidades vegetales principales en la Cuenca Amazónica, pero en áreas pequeñas hay otras comunidades debido a que el clima es seco o no hay drenaje (Tabla 8). En el último caso, los bosques de palmas y praderas son más comunes.

Bosque Húmedo Tropical

El bosque húmedo tropical contiene árboles que son siempre verdes. Esto quiere decir, especies que continuamente cambian de hojas y desarrollan nuevas simultáneamente, aunque algunas especies pueden cambiar todas sus hojas

TABLA 8

Áreas de las principales clases de vegetación en la Cuenca Amazónica (Cochrane *et al.* 1984). El total excluye cuatro sistemas de tierras (Ab 326, Gb643, Gb644 y Gb646 con un área total de 233.476 km²) para las cuales Cochrane *et al.* (1984) no dieron datos sobre la proporción de tierra dentro del sistema

Tipos de Vegetación	Área, km ²
Bosque Húmedo Tropical	1 240 578
Bosque Estacional Semi-siempre verde Tropical	2 354 409
Bosque semi-decíduos Tropical	177 392
Zonas Estacionales Inundables	13 951
Tipos de Cerrados	190 598
Catinga	98 392
Otros	1 254 403
Total	5 329 722

por períodos cortos a intervalos irregulares. Los árboles grandes pueden tener raíces superficiales, comúnmente en áreas mal drenadas. También se encuentran palmas, pero no tan frecuentemente como en los mismos bosques en áreas mal drenadas.

El bosque húmedo es una comunidad estratificada, usualmente con tres niveles. El estrato más alto tiene por lo general más de 30 m de altura, y no es completamente cerrado. Los niveles intermedio y bajo tienen pequeños árboles, particularmente adaptados a nichos de microclimas de la estructura del bosque. Generalmente los árboles no son especímenes inmaduros del estrato más alto, sino especies adaptadas a bajas intensidades de luz.

Una característica de los bosques húmedos es su riqueza de especies, con las familias Rosaceae, Compositae y Leguminosae como las más representativas. Las lianas y epífitas son también muy comunes. El estrato de arbustos está pobremente desarrollado, usualmente consiste de algunos helechos (Cochrane *et al.* 1984). El área de bosque húmedo es menos del 25% del área total de la Cuenca Amazónica (Table 8).

Bosque tropical estacional semi-siempre verde

Contrariamente a la estructura estratificada del bosque húmedo, el bosque estacional semi-siempre verde tropical comúnmente tiene dos estratos. Durante la estación seca, 20 a 30% de los árboles en la parte alta del estrato cambian sus hojas, aunque los árboles en el estrato inferior permanecen siempre verdes. Los árboles en el estrato alto pueden tener hasta 25 m o más de altura (Cochrane *et al.* 1984). Las especies que cambian sus hojas parecen ser deciduas facultativas para evitar los efectos severos de las épocas secas.

Al compararlos con el bosque húmedo, los árboles tienen raíces profundas. Muchas especies florecen a principios de la época húmeda. Los árboles comúnmente tienen hojas pequeñas a diferencia de los árboles del bosque húmedo, especialmente aquellos del estrato bajo. Los troncos son rectos y se ramifican en lo alto. Los estratos son compactos y redondos o cónicos. Esta comunidad comprende cerca del 45% del área total descrita por Cochrane *et al.* (1984).

Bosque tropical estacional semi-deciduo

Esta comunidad es otro bosque que comprende dos estratos. El estrato más alto tiene cerca de 15 m de altura y es principalmente de especies deciduas. El estrato más bajo tiene de 4 a 10 m de altura y es predominantemente siempre verde. En contraste con el bosque estacional semi-siempre verde, los troncos son fuertes y las ramas más cercanas a la superficie tienen forma de sombrilla o un estrato plano.

Geología y suelos

El escudo de las Guyanas, que se encuentra principalmente en el sur de Venezuela, data del preámbrico; junto con la parte de Brasil que está en la Amazônia Legal, son las superficies terrestres más antiguas en Sur América (Cochrane *et al.* 1984). Entre estas dos áreas están los sedimentos más jóvenes de las eras Terciaria, Cuaternaria y recientes. Al final del Plioceno o al comienzo del Plesoceno, el mayor levantamiento de los Andes, principalmente a través de un levantamiento vertical y de fallas de bloques y dobleces. La cordillera Andina continúa en un estado activo de erosión, particularmente en el piedemonte sub-Andino. En partes de Perú y Bolivia aún continúa la erosión de piedras y conglomerados de rocas a pesar de la cobertura vegetal.

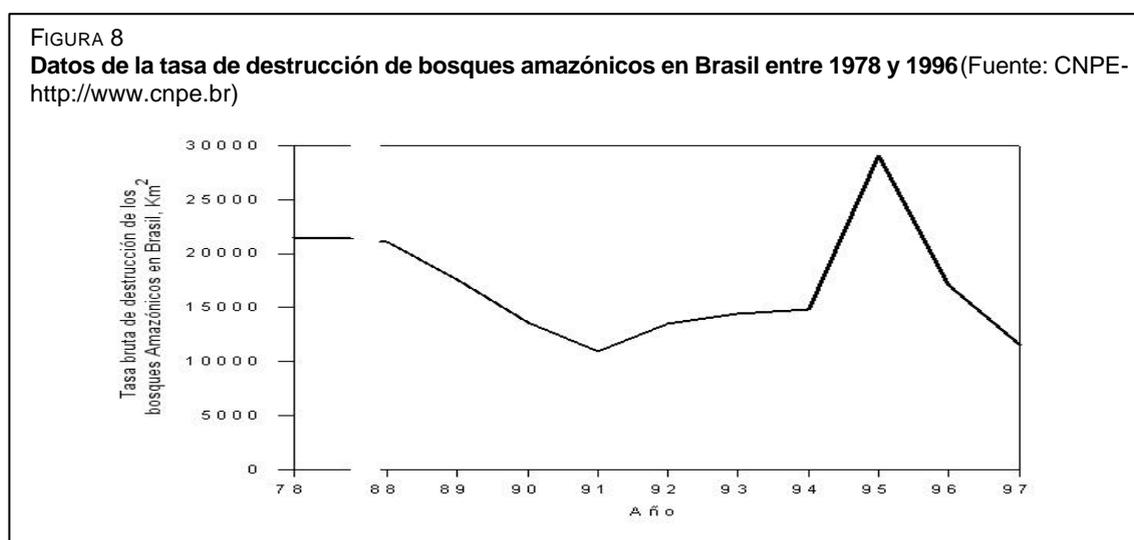
Los suelos son principalmente Oxisoles y Ultisoles, altamente ácidos, con pH, usualmente menores que 5,3 y frecuentemente tan bajos como 4,2 (Cochrane *et al.* 1984). Los suelos son de

muy baja fertilidad, aunque su estructura es moderadamente buena. En contraste con suelos similares en la sabanas, su capacidad para fijar fósforo es más baja.

Los Entisoles, principalmente de origen aluvial, e Inceptisoles ocurren en los valles de los ríos. Estos suelos son más fértiles que los Oxisoles y Ultisoles y aunque están en menor proporción son igualmente importantes para la agricultura.

Tipos de uso de suelo y sus áreas

Es difícil obtener datos actuales para el uso del suelo en la región basados en los sistemas de tierras descritas por Cochrane *et al.* (1984). Estos autores dan datos detallados para el uso del suelo en cada sistema de tierras que describieron. Sin embargo, sus datos están basados en imágenes de satélites de 1977 a 1981. Como los datos no son actuales, no muestran las altas tasas de deforestación de la región de los que se informa en otros estudios en la última década (ver, por ejemplo, la Figura 8).



El estado de Pará, Brasil, es la parte que tiene una mayor tasa de deforestación en los últimos 20 años. En agosto de 1996, esta región contribuía con más del 34% del total del área deforestada en la Amazonia (Tabla 9 y 10).

TABLA 9

Área bruta del área de deforestación en los Estados de la Amazônia Legal del Brasil, km². Fuente: Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais INPE

Estado	En 78	Ab 88	Ag 89	Ag 90	Ag 91	Ag 92	Ag 94	Ag 95	Ag 96
Acre	2500	8900	9800	10300	10700	11100	12064	13306	13742
Amapá	200	800	1000	1300	1700	1736	1736	1782	1782
Amazonas	1700	19700	21700	22200	23200	23999	24739	26629	27434
Maranhão	63900	90800	92300	93400	94100	95235	95979	97761	99338
Mato Grosso	20000	71500	79600	83600	86500	91174	103614	112150	119141
Pará	56400	131500	39300	144200	148000	151787	160355	169007	176138
Rondônia	4200	30000	31800	33500	34600	36865	42055	46152	48648
Roraima	100	2700	3600	3800	4200	4481	4961	5124	5361
Tocantins	3200	21600	22300	22900	23400	23809	24475	25142	25483
Amazonia Legal	152200	377500	401400	415200	426400	440186	469978	497055	517069

Tabla 10

Tasa de aumento de deforestación en los estados de Amazonia Legal del Brasil, km² año. Fuente: Ibid.

Estado	78/88*	88/89	89/90	90/91	91/92	92/94**	94/95	95/96	% del total
Acre	620	540	550	380	400	482	1208	433	2,70
Amapá	60	130	250	410	36	-	9	-	0,30
Amazonas	1510	1180	520	980	799	370	2114	1023	5,30
Maranhão	2450	1420	1100	670	1135	372	1745	1061	9,20
Mato Grosso	5140	5960	4020	2840	4674	6220	10391	6543	23,00
Pará	6990	5750	4890	3780	3787	4284	7845	6135	34,10
Rondônia	2340	1430	1670	1110	2265	2595	4730	2432	9,40
Roraima	290	630	150	420	281	240	220	214	1,00
Tocantins	1650	730	580	440	409	333	797	320	4,90
Amazônia Legal	21130	17860	13810	11130	14960	14896	29059	18161	

* Tasa promedio por año sobre la década. ** Tasa promedio por año sobre los dos años.

Pronóstico para el futuro

En 1995 la tasa de deforestación en la Amazonia brasileña alcanzó un máximo de 29.059 km² y cayó en 1997 a una tasa menor ya registrada, de 13 037 km², confirmando una tendencia iniciada en 1996, cuando el índice cayó cerca de 40%.

El INPE y la IBAMA entienden que hay tres posibilidades relacionadas con la dinámica socio-económica de la región por el aumento de la tasa de deforestación en 1995.

- *aumento de consumo de alimentos* básicos presionado tanto por la migración rural-urbana, como por el aumento de poder adquisitivo;
- *expansión de la agricultura*, impulsada por la reducción del valor de la tierra y la disponibilidad de tecnología y demanda del mercado;
- *aumento del consumo de madera dura* debido al crecimiento de la construcción civil y de las reformas de residencias. En el Brasil, el consumo de esta madera ha estado dependiendo de la Amazonia; con el aumento del consumo maderero en el Centro-Sur del país son inyectados recursos financieros que alimentan una nueva ola de deforestación;
- *invasión de áreas forestales* practicadas por las personas sin tierra y los dueños de tierras.

De acuerdo con el INPE y el IBAMA, las reducciones en la tasa de deforestación en los últimos dos años son ocasionadas por las acciones del gobierno, que tomó medidas de restricción de la conversión de los bosques para usos agropecuarios, como el objetivo de la concesión fiscal para deforestación en 1989. Las medidas legales redujeron el área de *corte raso* de 50% a 20% de las propiedades en la Amazonia y una moratoria de la caoba en 1996. En estos períodos el gobierno también fiscalizó de forma más intensa la región, con grandes operaciones de control, p. ej. la "Operação Macauã" que en el año 1997 alcanzó resultados sin precedentes de incautaciones y multas.

A pesar de las críticas externas e internas (ver p. ej. Fearnside, 1997), el gobierno de Brasil está tratando de establecer los límites de la tasa de deforestación de su Amazônia Legal. Es posible que el área deforestada se estabilice alrededor del 11%, si las tendencias de deforestación para los años 1996 y 1997 continúan.

Capítulo 2

Diagnóstico de las contribuciones al secuestro del C por parte de bosques secundarios y gramíneas cultivadas

COMPARTIMIENTOS DE CARBONO

El C es la unidad de construcción de la vida. El CO₂ en la atmósfera es fijado por las plantas mediante el proceso de fotosíntesis, o sea la conversión de CO₂ gaseoso a glucosa, producto básico del proceso. Parte de la glucosa es metabolizada en energía para el crecimiento y mantenimiento y el resto se convierte en otros compuestos que constituyen los organismos vivos.

En cualquier sistema biológico, el C se encuentra en varios compartimentos del sistema conocidos como reservas. En los sistemas terrestres, es conveniente dividir estas reservas en aéreas - sobre la superficie del suelo - y subterráneas. En general cuando hay cambios en el uso de la tierra, las reservas aéreas son mucho más vulnerables que aquellas subterráneas. Por ejemplo, pueden haber grandes pérdidas aéreas cuando un bosque es cortado o quemado. Igualmente, puede haber una rápida acumulación de C por regeneración de bosques secundarios, aunque la acumulación es mucho más lenta que las pérdidas que ocurren cuando un bosque es quemado. Aun más, los cultivos pueden también permitir grandes pérdidas de C del suelo.

El C aéreo está en la materia vegetal viva y muerta en varios estados de descomposición. Dependiendo en la escala del tiempo, todas las plantas crecen más o menos de manera continua, aunque hay efectos estacionales de sequía durante el cual el crecimiento puede ser bajo o no ocurrir. Todos los órganos de las plantas siguen una secuencia de iniciación, crecimiento, madurez, senescencia y muerte. A medida que los órganos mueren, normalmente se caen de la planta, aunque en el caso de los árboles, los tallos y sus ramas son lignificadas y se pueden mantener intactos. En una planta madura, como un árbol en un bosque maduro, el proceso de crecimiento y senescencia están en equilibrio por lo tanto no hay ni pérdida ni ganancia de biomasa. Los individuos mueren y otros toman su lugar, pero la biomasa de la comunidad es más o menos estática o constante.

Las partes de las plantas caen a la superficie del suelo y son vulnerables al consumo por parte de microorganismos y macroorganismos. La hojarasca se acumula en la superficie del suelo a un nivel más o menos constante. Las tasas de senescencia, mortalidad y de la caída de las partes aéreas son iguales a las tasas de consumo por los micro y macroorganismos. Parte de la materia consumida por los organismos es metabolizada y parte de ella excretada. La parte que es metabolizada retorna a la atmósfera como CO₂. También los organismos crecen, maduran y mueren y sus excreciones y cuerpo son fuentes de alimento para otros organismos en la cadena alimenticia.

La actividad de los macro y micro organismos en la hojarasca aérea permite nuevamente su incorporación al suelo, con mayor tasa de acumulación en la parte superior del perfil. A medida que el proceso de incorporación de la hojarasca aérea y los detritos de los organismos en el suelo continúa, el material incorporado progresivamente se convierte en ácidos húmicos y fúlvicos en el proceso conocido como humificación.

Debajo de la superficie del suelo hay raíces vivas y muertas, aunque a diferencia de la hojarasca aérea, las raíces muertas permanecen dispersas a través del perfil del suelo. Aunque las raíces están concentradas en la parte superior de los perfiles, pueden extenderse a grandes profundidades. Por ejemplo, Nepstad *et al.* (1994) encontró raíces en un bosque primario de la Amazonia oriental a 8 m de profundidad. Fisher *et al.* (1994; 1996) encontraron que el 75 a 95% del incremento del C orgánico en suelo, bajo gramíneas africanas introducidas en los Llanos Orientales de Colombia, estaba a más de 20 cm de profundidad. Propusieron la hipótesis de que las raíces profundas de las especies introducidas comparadas con las raíces de las gramíneas nativas fueron en parte las responsables de la acumulación de C.

MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO (MOS)

El C en el suelo puede estar presente en dos formas: Carbono Orgánico del Suelo (COS) y Carbono Inorgánico del Suelo (CIS). El COS es el componente principal de la materia orgánica del suelo (MOS), la cual juega un papel importante en la productividad de los suelos tropicales, como reserva de nutrientes. La MOS es:

1. fuente de energía para los organismos heterotróficos en el suelo;
2. reserva y fuente de N, P, S y otros nutrientes requeridos por las plantas;
3. influye en el pH del suelo y en la capacidad de intercambio catiónico y aniónico; y
4. juega un importante papel en la estructura del suelo y otras propiedades físicas del suelo.

Los suelos de la Amazonia son en su mayoría *acrisoles* y *ferralsoles* con algunos *luvisoles* (Cochrane *et al.* 1983). Ni los *acrisoles* ni los *ferralsoles* contienen C inorgánico y tampoco los *luvisoles* Amazónicos debido a su acidez.

Propiedades físicas y químicas

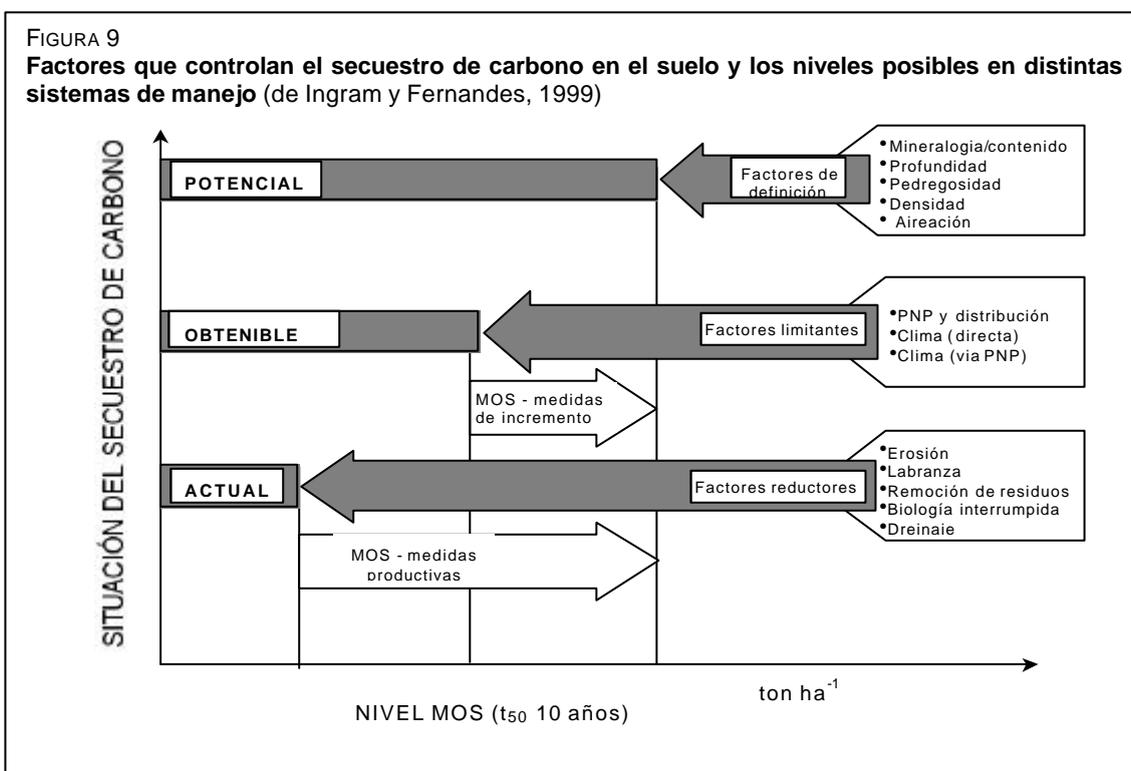
La MOS presenta un estado dinámico y consiste en dos grupos: húmico y no húmico. Las sustancias húmicas son del 60 al 80% del total de la MOS y las más resistentes al ataque de los microorganismos. También se caracterizan por un anillo aromático que incluyen polifenoles y poliquinonas. Estas sustancias no tienen propiedades físicas y químicas definidas; son amorfas, de color oscuro y tienen un peso molecular entre alto y muy alto. Con respecto a la resistencia a la degradación y a la solubilidad en ácidos y sustancias alcalinas, las sustancias húmicas pueden ser clasificadas en tres subgrupos: (1) ácido fúlvico, bajo en peso molecular y de color claro, soluble tanto en sustancias ácidas como alcalinas y muy susceptible al ataque de microorganismos. (2) ácido húmico, de peso molecular medio, soluble en sustancias alcalinas pero no en las ácidas e intermedio en la resistencia a la degradación; y (3) huminas, de alto peso molecular, más oscuras, insoluble tanto en sustancias ácidas como alcalinas y mucho más resistentes al ataque de microorganismos.

El grupo de sustancias no húmicas, corresponde del 20 al 30 % de materia orgánica. Estos compuestos son menos complejos y resistentes al ataque de microorganismos. Tienen características físicas bien definidas. Algunas de estas sustancias son modificadas solamente por la acción de

microorganismos mientras que otras son sintetizadas por los mismos. Entre las sustancias no húmicas están los polisacáridos, los ácidos orgánicos, los materiales proteicos y las poliuronidas.

Controles principales de la formación de la MOS

Ingram y Fernandes (1999) usaron los conceptos desarrollados por Rabbinge y Van Ittersum (1994) y Van Ittersum y Rabbinge (1997) para analizar las limitaciones de la producción de cultivos. Al considerar el desempeño de un cultivo, la *producción potencial* es la obtenida cuando no hay limitaciones climáticas o en el suelo para el crecimiento de las plantas. En este caso, la producción obtenida es limitada solamente por procesos básicos fisiológicos, como la fotosíntesis. La *producción potencial* no se puede lograr en el campo debido a las limitaciones ambientales, como niveles bajos de nutrientes y agua. La *producción alcanzable* es la producción máxima, que aunque en condiciones óptimas no puede igualar la producción potencial. La *producción actual* es la obtenida por los agricultores en sus fincas, donde los cultivos están sujetos a condiciones no óptimas de fertilidad, clima, malezas, y pestes y enfermedades. Obviamente, a medida que las prácticas culturales sean mejores, el agricultor se acercará a la producción alcanzable. Ingram y Fernandes (1999) aplicaron este concepto al secuestro de C en el suelo, argumentando que el mismo marco podría permitir una conceptualización más clara de los factores involucrados y como podrían sobrellevarse las limitaciones (Figura 9). El secuestro de C potencial será controlado por un número de *factores definidos* como la mineralogía y la composición mineral del suelo, que define su textura, profundidad, densidad aparente y aireación.



La magnitud a la que el nivel potencial del C en el suelo puede llegar será controlada por *factores limitantes*, como la Productividad Neta Primaria (PNP) de las plantas que crecen en el suelo - comunidades naturales o cultivos, incluyendo pastos y otras planta introducidas -, por la distribución de la PNP aérea y subterránea, por los efectos directos del clima en los procesos del

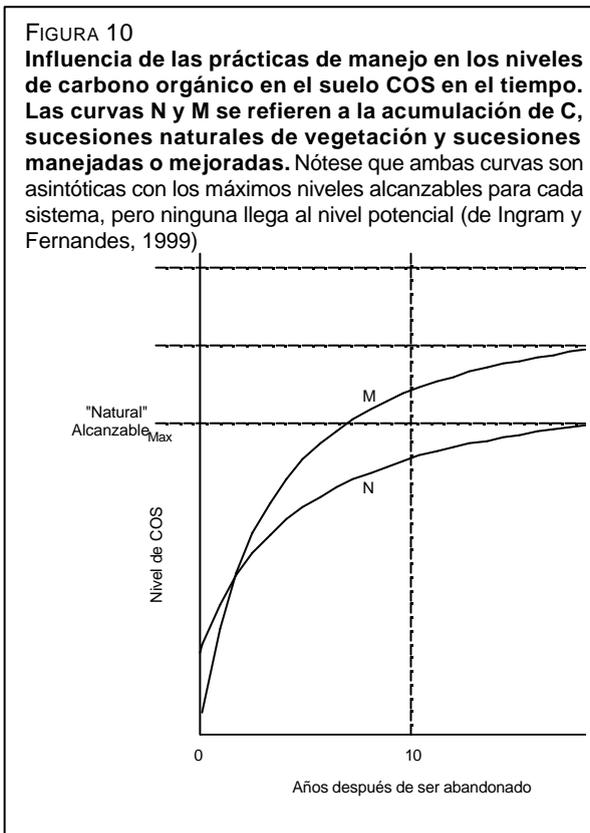
suelo - principalmente la temperatura, la cantidad y la distribución de la precipitación - y por los efectos indirectos del clima en PNP. Los niveles actuales del secuestro de C en el suelo serán controlados por *factores de reducción*, entre los cuales están las pérdidas directas por erosión y las causadas por la labranza. Las prácticas de manejo de residuos de las cosechas, especialmente si se remueven del sitio, pueden limitar la cantidad de C que entra al suelo, mientras que si se disturba la biología de éste, como cuando se efectúan quemas, pueden haber efectos grandes y prolongados.

Otro ejemplo de la perturbación de la biología del suelo, es el cambio que ocurre en la macrofauna cuando el área se convierte a agricultura. Las lombrices de tierra que viven en el suelo bajo bosques son eliminadas cuando éstos son talados y reemplazadas por una especie invasora. Las actividades de las lombrices, en la superficie del suelo, resultan en una disminución de la tasa de infiltración de agua y una pobre aireación. No se sabe hasta dónde estas especies son responsables de la compactación que se observa en el suelo cuando el bosque se convierte a otros usos, como producción de ganado (P. Lavelle, comunicación personal 1996).

Lo contrario ocurre cuando en las comunidades de sabanas se siembran pastos introducidos (Tabore *et al.* 1996; Jiménez *et al.* 1998), la biomasa de la macrofauna nativa del suelo puede aumentar hasta 10 veces. Parece ser que las especies de macrofauna del bosque no están adaptadas para los cambios en la calidad de la hojarasca o la composición que ocurre cuando el bosque se reemplaza (P. Lavelle, comunicación personal 1996). Por el contrario, las especies de lombrices en las comunidades vegetales de las sabanas son estimuladas por el mejoramiento que ocurre en la calidad de la hojarasca, cuando las especies de gramíneas de baja calidad se reemplazan por gramíneas y leguminosas introducidas. El incremento masivo puede ser uno de los principales factores que explique la gran cantidad de C acumulado en profundidades cuando las sabanas son convertidas a pastos introducidos (Fisher *et al.* 1994, 1997).

Una labor prioritaria y obvia, es investigar si es posible manipular la población de la macrofauna del suelo. Si las especies del bosque son reemplazadas por invasores indeseables, ¿no sería mejor introducir especies benéficas?. Esta puede ser una manera para evitar la perturbación de la biología del suelo, aunque deben hacerse muchas pruebas para evitar la posibilidad de especies indeseables y luego ver efectos secundarios.

Considerando el medio por el cual puede ser logrado el potencial alcanzable, Ingram y Fernandes (1999) consideraron diferentes niveles de alcanzabilidad, como por ejemplo, un sistema de regeneración “natural”, bosque secundario (Figura 10, curva N) y un “sistema mejorado o manejado” (curva M), como por ejemplo un sistema agroforestal en donde el manejo consiste en



la aplicación de fertilizantes. Por el contrario un bosque secundario mejorado podría presumiblemente tener tasas de acumulación mayores, pero sería posible que llegue al nivel alcanzable de C en el suelo.

Ingram y Fernandes (1999) también discutieron la escala de tiempo sobre la cual el secuestro de C en el suelo podría esperarse y cómo las mediciones a corto plazo pueden dar resultados erróneos para conclusiones a largo plazo (Figura 11). En la práctica A, el secuestro C inicial es más rápido comparado a la Práctica B, pero mientras que ambos llegan al mismo nivel, en un término medio, la Práctica B llegará al mismo nivel más rápidamente que la Práctica A, aunque inicialmente A sea “mejor”. Por lo tanto, no es posible pronosticar resultados a largo plazo a partir de datos de corto plazo.

Influencia de Productividad Neta Primaria (PNP)

Long *et al.* (1989;1992) midieron la PNP de pastos nativos en cinco sitios de praderas en los trópicos. Los sitios fueron: una pradera salina en Montecillos (México), una seca en el Parque Nacional de Nairobi (Kenya), una sabana subhúmeda en Klong Hoi Kong (cerca de Hat Yai, Tailandia), un bosque de bambú en el Valle de Miao Shan (China) y una pradera inundable cerca de Manaos (Brasil). Se estimó la senescencia aérea y el recambio de raíces a una profundidad de 15 cm.

Usando esos datos, Long *et al.* (1989; 1992) estimaron la diferencia en los valores de PNP obtenidos por el método común, el cual generalmente ignora las pérdidas por senescencia y recambio de raíces (Tabla 11). Se encontró que la PNP en las praderas naturales eran entre 0,14 a 10 kg. MS m⁻² año⁻¹, cinco veces más que lo previamente calculado aplicando la metodología del Programa Biológico Internacional (Milner y Hughes, 1968).

Aunque Long *et al.* (1989, 1992) fueron los primeros en incluir las raíces en el cálculo de la PNP, solo midieron raíces hasta 15 cm de profundidad, basados principalmente en estudios de distribución de raíces en cultivos. Se sabe que los cultivos han sido alterados por programas de mejoramiento para incrementar la materia de importancia económica por medio de reducciones del crecimiento vegetativo, incluyendo las raíces (Gifford *et al.* 1984). Contrariamente a los cultivos, muchas especies de las praderas naturales han sido poco modificadas por los fitomejoradores. La mayoría de las especies introducidas en los trópicos son especies que componen praderas nativas en otros sitios en el mundo, seleccionadas por su adaptación a las presiones bióticas y abióticas como también por su capacidad para tolerar presiones de pastoreo entre medias a altas (Fisher *et al.* 1997).

FIGURA 11
Influencia de la escala de tiempo sobre consideraciones de manejo para secuestro de C en el suelo. Práctica A resulta en mayores ganancias relativas a Práctica B a el corto plazo, pero menores en el largo plazo (de Ingram y Fernandes, 1999)

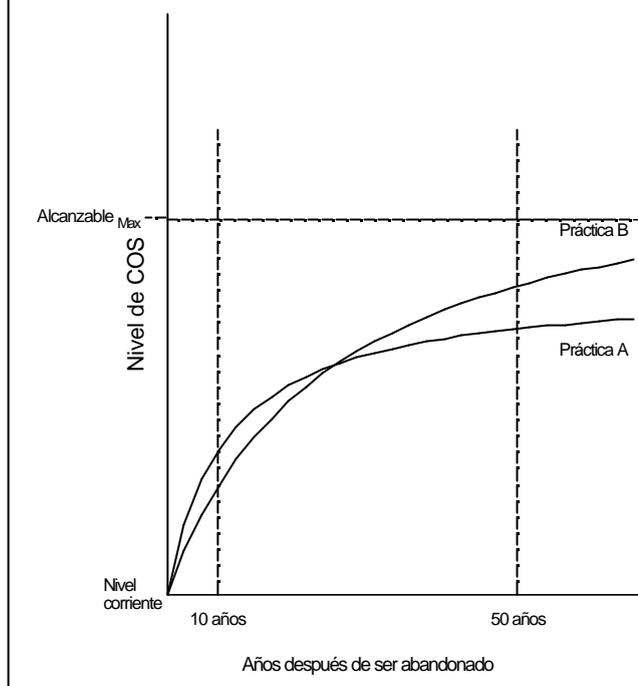


TABLA 11

Comparación de las estimaciones de la productividad neta primaria, teniendo en cuenta las pérdidas por mortalidad y producción subterránea a 15 cm de profundidad, con estimaciones considerando solamente los cambios en la biomasa (de Long *et al.* 1989)

Producción Neta Primaria (g m ⁻² año ⁻¹)	Montecillos, México	Nairobi, Kenia	Klong Hoi Kong, Tailandia
Teniendo en cuenta mortalidad (incluyendo órganos subterráneos)	1741	1242	2220
Teniendo en cuenta mortalidad (parte aérea solamente)	1063 (39%)*	811 (35%)	1595 (28%)
IBP Método estándar (incluyendo órganos subterráneos)	740 (56%)	663 (47%)	663 (74%)

* Los valores en paréntesis de la productividad son subestimados como un porcentaje de PNP en 12 meses.

Por otro lado, el énfasis del antiguo programa de Pastos Tropicales del Centro Internacional de Agricultura Tropical y sus colaboradores en la Red de Evaluación de Pastos Tropicales, se basó en gramíneas con un abundante y profundo sistema radicular para la toma de agua y nutrientes a grandes profundidades en el suelo. Fisher *et al.* (1994) especularon que las raíces profundas eran al menos uno de los mecanismos para el secuestro de C por las gramíneas introducidas en las sabanas neotropicales. Sin embargo, hay pocas mediciones de la contribución de las raíces a la PNP.

Jackson *et al.* (1996) ajustaron un modelo de descomposición exponencial a una serie de datos para cada una de las biomásas y cultivos en la literatura. Se estimó la proporción de raíces en los primeros 30 cm a partir del modelo y se calcularon el promedio de la biomasa de raíces y la proporción de raíces/parte aérea. Los datos para cultivos, praderas templadas y sabanas y praderas tropicales se muestran en la Tabla 12. Los datos de las sabanas y praderas tropicales no incluyen un sitio en las sabanas de Sur América. Los datos de porcentaje de biomasa de raíces son diferentes para praderas templadas y tropicales, pero estas últimas tienen más raíces mucho más profundas.

TABLA 12

Estimaciones de la proporción de raíces, rendimiento de raíces y relación parte subterránea: parte aérea en praderas naturales y en cultivos (de Jackson *et al.* 1996)

Biome	% de biomasa de raíces en la capa 0-30 cm	Biomasa promedio de raíces (kg m ⁻²)	Subterránea:aérea
Cultivos	70	0,15	0,1
Praderas templados	83	1,3	0,7
Praderas tropicales-savannas	57	1,4	0,7

Los datos de Long *et al.* (1992) muestran que todos los sitios en sus estudios tuvieron un potencial para la acumulación neta de C. En la ausencia de quemadas, las praderas en México, Kenia y Tailandia acumularon un promedio de 144 g C m⁻² año⁻¹, mientras que con quemadas - cada dos años - solo 40 g C m⁻² año⁻¹. Encontraron pérdidas netas de 70 g C m⁻² año⁻¹ con quemadas frecuentes y sequía. Esto sugiere que estos factores, quema y sequía, podrían cambiar a las praderas de ser una fuente a un sumidero para C. Estos estudios demuestran que las comunidades dominadas por gramíneas tienen el potencial para actuar como un sumidero de C.

Influencia de la textura del suelo

La textura del suelo influye en el porcentaje de MO. Los suelos con alto contenido de arcillas y limos tienen generalmente mayor cantidad de MO que los suelos con texturas gruesas. La tasa de recambio de residuos orgánicos del suelo es también mayor en suelos de textura fina, mientras que

la tasa de oxidación puede ser menor que en suelos arenosos. Los suelos con alto contenido de arcilla protegen la materia orgánica de la degradación y esto resulta en un mayor contenido de MO.

Influencia de la fertilidad del suelo

Influencia del uso de abonos y fertilizantes

El uso de cal, fósforo, fertilizantes y abonos verdes influye en el nivel de MOS, debido al incremento en la cantidad de residuos que pueden retornar al suelo. En campos puros de gramíneas, la cantidad de C acumulado es constante en aproximadamente 3 t ha⁻¹ año⁻¹, mientras que con un componente leguminoso, la tasa es de 2,5 a 5 veces más (Fisher *et al.* 1994, Trujillo *et al.* 1997). La tasa constante de acumulación de C por parte de pastos puros, sugiere que el proceso está limitado y el incremento de la tasa con una leguminosa sugiere que la limitación es el N. Si esto es cierto el establecimiento de leguminosas en pastos incrementará su capacidad de acumular C. Si existe un nuevo valor de equilibrio para la cantidad máxima de C que puede ser acumulada en el suelo, el aumento de la tasa de acumulación significará que el valor del equilibrio se alcanzará más rápido. No se conoce sin embargo, cual es el valor nuevo del equilibrio y por eso el papel del aumento de la tasa es incierto. Existen otras opciones para incrementar el suplemento de N en un pasto de gramínea sola como la aplicación de fertilizantes nitrogenados y buscar medios para aumentar la fijación de N asociativa (Fisher *et al.* 1996). El papel del suplemento del N, para aumentar la tasa del secuestro de carbono, se discutió anteriormente, pero se debe recordar que hay un costo de C en la industria de la mayoría de los fertilizantes nitrogenados. El uso de fertilizantes en cualquier pradera es muy limitado en el neotrópico pero en sistemas agropastoriles el pasto hace uso del fertilizante residual aplicado a los cultivos que necesitan mayores niveles de fertilizantes (Thomas *et al.* 1995). En este contexto es el cultivo y no el pasto, el que tiene altos insumos y costos ambientales. En sistemas agropastoriles el uso de fertilizantes para aumentar la producción agrícola y la acumulación de C puede ser económicamente viable y una opción de “ganar – ganar”.

Fuente de N

Los pastos introducidos, en los cuales Fisher *et al.* (1994) midieron la acumulación de C, recibieron una fertilización - P, K, Ca, Mg y S pero no N - moderada al momento del establecimiento. Las sabanas evaluadas no fueron fertilizadas y se sabe que escasamente responden a la fertilización a diferencia de los pastos introducidos. El pasto, que incluyó un componente leguminoso, acumuló una mayor cantidad de C que los pastos sin leguminosas, aunque todos recibieron las mismas cantidades de fertilizantes al establecimiento y mantenimiento. Esto indica un papel catalítico de la leguminosa. En la estación experimental de Carimagua, una pradera de *Brachiaria humidicola* asociada a *Arachis pintoi* acumuló 6,7 t C ha⁻¹ año⁻¹ más que cuando creció sola (Fisher *et al.* 1994). No es claro sin embargo cómo la leguminosa aumentó la cantidad de C acumulado. Una posibilidad es un aumento en la productividad como consecuencia de la fijación biológica de N, pero en suelos bien meteorizados como los Oxisoles deben haber otras razones, como por ejemplo el papel del Ca en la retención de C en el suelo (Oades *et al.* 1988). El calcio frecuentemente se encuentra en grandes concentraciones en los residuos de las leguminosas en comparación al contenido en las gramíneas (Thomas y Asakawa 1993).

No se sabe si las altas proporciones de C/N medidas por Fisher *et al.* (1995, 1998), también ocurren en especies similares en la Cuenca Amazónica. En la ausencia de otros datos sólo se puede concluir que las proporciones son similares. Es importante anotar que en los Oxisoles de la Amazonia Brasileña, Cerri *et al.* (1994) informaron acerca de una tasa de acumulación de 0,7 kg. m⁻² año⁻¹ a 20 cm de profundidad en *Brachiaria humidicola* sin fertilizar. La acumulación continuó durante ocho años de mediciones.

Además del N que es fijado biológicamente y necesario para acumular esas cantidades de C, el sistema radicular profundo de las especies de gramíneas introducidas, permiten el reciclaje de N exudado al perfil del suelo. El aumento en la acumulación de C debe inmovilizar cantidades significativas de N en el suelo, aunque es difícil detectarlo.

En un Ultisol sembrado con pastos, se obtuvieron tasas menores de mineralización que en los bosques no disturbados y en algunos casos se midió la inmovilización de N (Neill *et al.*, 1995). Los autores sugieren que bajo pastos, el ciclo del N fue más ajustado y con menos pérdidas. En la misma área, Piccolo *et al.* (1994) informaron de valores bajos de $\delta^{15}\text{N}$ en pastos a una profundidad de 20 cm comparado con los suelos bajo bosques. Esto indica que puede haber una fijación biológica de N en los pastos. Las diferencias entre las gramíneas para utilizar N^{15} de las fuentes de N inorgánico, puede parcialmente explicar las discrepancias en $\delta^{15}\text{N}$ en el suelo. Si ocurre la fijación biológica de N por bacterias de vida libre asociadas con gramíneas, (Boddey y Dobereiner, 1988) existe la necesidad de cuantificar la cantidad y destino de ese N en pastos tropicales.

Claramente, las preguntas sobre las entradas de N y de las proporciones C/N de las fracciones de MOS necesitan ser aclaradas para explicar como el C puede acumularse en pastos tropicales introducidos.

Influencia del clima

Las condiciones climáticas, especialmente temperatura y precipitación, influyen en la cantidad de MOS. El contenido de materia orgánica aumenta a medida que la temperatura disminuye. La humedad de suelo también tiene un efecto positivo en la acumulación de MOS: a medida que la humedad en el suelo se incrementa, la MOS también lo hace.

Es difícil diferenciar entre los efectos climáticos y de la vegetación en el contenido de MOS. En zonas climáticas donde la vegetación incluye tanto bosques como praderas, el contenido de MOS es mayor en los suelos bajo praderas que bajo bosques. Aparentemente, la naturaleza de los residuos orgánicos de las praderas y su modo de descomposición, permiten una tasa descomposición menor y de esta manera un mayor nivel orgánico que la que se encuentra bajo bosques.

Influencia de la humedad y el drenaje del suelo

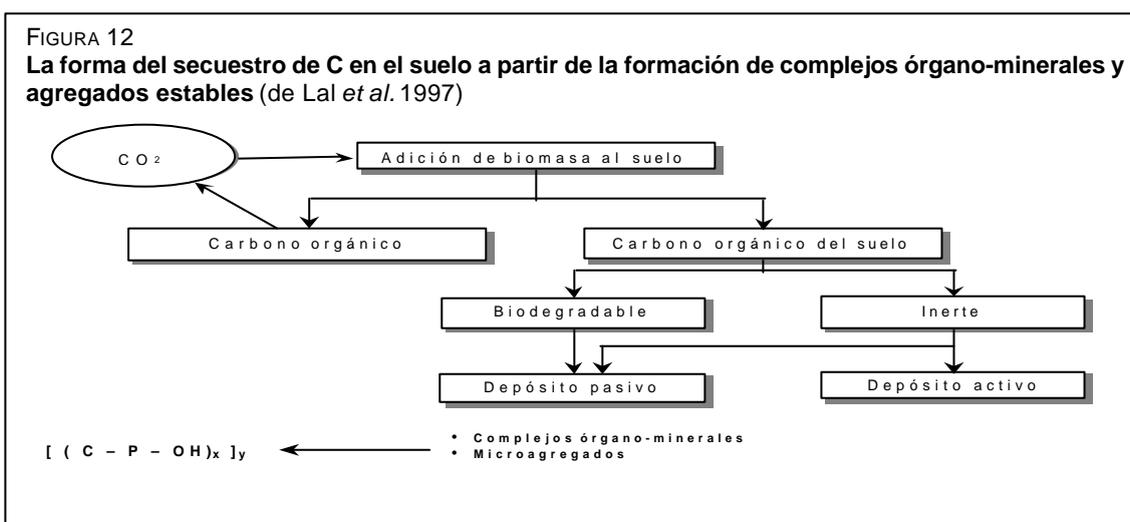
Los suelos mal drenados tienen un mayor contenido de MO que los bien drenados debido a la alta humedad y la mala aireación. En la Amazonia, hay grandes áreas de suelos mal drenados por las frecuentes inundaciones durante la mayor parte de la época húmeda. Existen pocas probabilidades de mejorar el drenaje de éstos.

Brown y Lugo (1982) reportaron una relación positiva entre la cantidad de C y la humedad del suelo, que también fue asociada con las diferentes comunidades de plantas y tipos de suelo. Con incrementos en la humedad del suelo hubo un incremento en los materiales gruesos, los cuales se descomponen relativamente despacio y pueden resultar en un incremento del COS. Esto se sugirió como un factor causal en la acumulación MOS. Sin embargo, poco se sabe acerca de la conversión de este material en COS. Los suelos bajo pastos generalmente tienen mayor cantidad de COS comparado con los suelos bajo bosques (Lugo y Sánchez 1986; Lugo y Brown, 1993; Cerri *et al.* 1994). Los suelos en climas húmedos exhiben mayores variaciones en el contenido de C con cambios en el uso del suelo, tanto en la pérdida como en su recuperación (Lugo y Sánchez, 1986).

Fracciones de materia orgánica y agregados

La dinámica de los agregados juega un papel importante en el secuestro de C en el suelo. Existen dos procesos definidos, la estabilización de los agregados de las partículas primarias dentro del suelo y la retroalimentación con los complejos orgánicos - minerales. La materia orgánica se estabiliza en el suelo por uno de los siguientes mecanismos: resistencia bioquímica, estabilidad química o protección física. La resistencia química se debe a la bioquímica del sustrato - lignina y melanina - en sí y no permite a la flora y fauna del suelo descomponer la MO. La estabilidad química se debe a fuertes enlaces químicos entre la MO del suelo y los minerales en el suelo. En este caso los descomponedores no pueden romper los enlaces. Cuando las partículas de MO se incorporan en los agregados o se depositan en los microporos, las bacterias no tienen acceso a ella y es físicamente protegida contra la descomposición.

En la formación de los agregados, los productos microbianos son importantes materiales cementantes que fortalecen los enlaces entre las partículas y estabilizan la estructura de los agregados (Lynch y Bragg 1985, citados por Lal *et al.* 1997). Cuando los agregados se rompen, - como por ejemplo durante la labranza - la MO, que está físicamente protegida, es expuesta a la degradación y la mineralización de C ocurre con la liberación de nutrientes asociados. La incorporación regular de material vegetal en el suelo mejora la cantidad y calidad del humus y la formación de complejos orgánico-minerales (Lal *et al.* 1997, Figura 12).



La formación de agregados estables y complejos orgánico-minerales es importante para determinar el tiempo de residencia de C secuestrado en el suelo. El material incorporado en microagregados consiste en las reservas pasivas y pueden tener tiempos de residencia de siglos a milenios. (Tabla 13, Parton *et al.*, 1987).

RETENCIÓN DE CARBONO EN EL SUELO

Los modelos conceptuales y de simulación separan la materia orgánica del suelo (MOS) en fracciones que son fácilmente descompuestas y resistentes que se caracterizaron por bajas tasas de recambio. Parton *et al.* (1988) dividieron la MOS en tres fracciones:

1. fracción activa, que consta de microorganismos vivos y productos microbianos (tiempo de recambio entre 2 a 4 años);

TABLA 13

Rangos estimados de la cantidad y tiempo de recambio de varios tipos de MO almacenada en suelos agrícolas (de Jastrow y Miller, 1997)

Tipo de materia orgánica	Proporción de materia orgánica total	Tiempo de recambio (años)
Hojarasca	–	1 – 3
Biomasa microbial	2 – 5	0.1 – 0.4
Partículas	18 – 40	5 – 20
Fracción liviana	10 – 30	1 – 15
Entre microagregados ¹	20 – 35	5 – 50
Adentro microagregados ²		
Secuestrado físicamente	20 – 40	50 – 1000
Secuestrado químicamente	20 – 40	1000 – 3000

¹ Adentro los macroagregados pero afuera de los microagregados, incluyendo partículas, fracción ligera y C microbial.

² Adentro de los microagregados, incluyendo fracción liviana secuestrada y el C derivado de microbios.

- fracción lenta, que es más resistente a descomposición (tiempo de recambio de 20 a 50 años) como resultado de la protección física o química;
- fracción pasiva, que es físicamente protegida o químicamente resistente y tiene un tiempo de recambio más prolongado (de 800 a 1200 años).

Las fracciones de tamaños que van desde 53 a 2000 μm , dan una estimación precisa de la fracción lenta, mientras que fracciones menores que 53 μm , dan una estimación exacta de la fracción pasiva (Cambardella y Elliott, 1992). Por otro lado es importante estudiar la dinámica del secuestro del C al relacionar los grupos funcionales de la materia orgánica a los procesos claves en el suelo. Los métodos isotópicos son herramientas poderosas para dilucidar la redistribución de la MO, tiempos de recambio y residencia (Carter y Gregory, 1996).

Varios factores favorecen la retención del C en el suelo y permiten mayores tasas de recambio y tiempos de residencia (Oades, 1988). Estos incluyen, distribución por debajo de la superficie del suelo, asimilados con bajo contenido de nutrientes, materiales ricos en lignina y ceras, inundación, bajas temperaturas, texturas arcillosas, alta saturación de bases, agregación y superficies de cargas variables. Los factores que aceleran el flujo hacia el suelo de asimilados de C en las plantas son: hojarasca con concentraciones altas de asimilados, asimilados ricos en nutrientes, carbohidratos, aireación, altas temperaturas, textura arenosa, acidez y superficies con poca carga. Es obvio que la magnitud con la cual el suelo puede ser un sumidero de C depende del balance entre las tasas de los procesos de adquisición y la tasa de rotura tanto de C residente como del C adquirido (Parton *et al.* 1989). Se sabe muy poco acerca de ambos procesos en los suelos tropicales.

POSIBLES CONTRIBUCIONES AL SECUESTRO DEL C ATMOSFÉRICO

Por las razones mencionadas en la Sección *Compartimentos de carbono*, cualquier material por encima de la superficie del suelo, no puede ser reconocido como secuestrado, debido a que este material es vulnerable a la pérdida total o parcial en el evento de cambio en el uso del suelo. Además, en los bosques secundarios en regeneración, cuando la comunidad alcanza la madurez, la acumulación adicional de C solo puede ocurrir a una tasa muy baja, en respuesta a la fertilización de C, como sucede en los bosques primarios.

Las plantas responden a incrementos en la concentración de CO_2 en la atmósfera. Los estomas de las plantas funcionan de tal manera que pueden optimizar la tasa fotosintética con respecto a la pérdida de agua. Una consecuencia del mecanismo de optimización es que, a medida que la concentración ambiental de CO_2 aumenta, la conductibilidad estomatal - una medida del grado de apertura de los estomas - disminuye. Por esta razón, para cualquier tasa de fotosíntesis, las plantas pierden menos agua, lo que significa que hay un aumento en el uso eficiente de agua. Se ha

propuesto la hipótesis que el aumento en la eficiencia en el uso del agua, puede resultar en un incremento de la biomasa de bosques maduros, lo cual se conoce como el efecto de la fertilización de C.

Bosques primarios

Carbono en la parte aérea

El contenido de C en la biomasa de las plantas es generalmente constante para cualquier comunidad vegetal y está entre 42 y 48%. Por esta razón es relativamente simple calcular la biomasa de las comunidades vegetales. El método más común para estimar la biomasa en bosques, es el uso del área basal, área transversal del árbol por unidad de superficie. El área basal se calcula a partir del diámetro del árbol a una altura de 1,3 m - la altura al pecho - o el diámetro por encima de las raíces superficiales en especies que las tengan. Las relaciones alométricas entre el área basal y la biomasa se derivan para cada especie por medio de muestreos y se aplican a las mediciones del área basal para calcular la biomasa. Este método ha sido usado con considerable precisión por ingenieros forestales (ver Phillips *et al.* 1998 y las referencias allí citadas) y es el método base para el inventario de C de comunidades forestales, propuesto por el grupo Winrock (ver Sección *Propuesta de WINROCK*).

Si el efecto de la fertilización de C realmente existe, la biomasa de los bosques maduros debería incrementarse lentamente con el tiempo. El problema es medir pequeños incrementos en grandes áreas. Phillips *et al.* (1998) midieron un incremento de la biomasa de 0,97 t ha⁻¹ año⁻¹ sobre un total de 97 parcelas en la Amazonia (intervalos de confianza del 95 % 0,59 t ha⁻¹ año⁻¹). Phillips *et al.* (1998) convirtieron estos datos a C para obtener un incremento de 0,62 ± 0,37 t C ha⁻¹ año⁻¹.

Capítulo 3

Resumen de los sistemas y métodos de medición y análisis del secuestro del C

MEDICIONES DIRECTAS

Relaciones Alométricas

La metodología descrita por Woomer (1999) y por MacDicken (1997) consiste principalmente en la aplicación de las ciencias forestales y del suelo y metodologías ecológicas, para calcular el número de árboles de bosques y otras plantas asociadas; la biomasa de la hojarasca aérea y subterránea y los contenidos de C en el suelo. Además de subestimar el C del suelo por no hacer un muestreo lo suficientemente profundo, existen diferencias pequeñas pero importantes, que afectan el rigor estadístico de los datos que se obtienen

Sin embargo, los métodos buscan medir los cambios en las reservas de C con relación a los árboles. Los métodos dependen de la aplicación de lo que se llama “relaciones alométricas” que es el cálculo de la biomasa a partir del diámetro del árbol a la altura del pecho (1,3 m) o por encima de las raíces en el caso de árboles con raíces superficiales. Woomer y Palm (1999) recomiendan el uso de las relaciones alométricas (usadas en Woomer *et al.*, 1999), publicadas por FAO (1997).

$$\text{Biomasa de árbol} = \exp(-2.134 + (2.530 \ln D)), \quad (1)$$

donde D es el diámetro a 1,3 m de altura en cm, y biomasa es en kg. árbol⁻¹.

MacDicken (1997) recomendó que en plantaciones de especies exóticas es necesario establecer relaciones alométricas para cada una de las especies establecidas. De ninguna manera deben aceptarse datos sin una prueba preliminar para asegurar que las relaciones alométricas propuestas sean válidas para la comunidad forestal en consideración.

No hay métodos más viables que sean más rigurosos. La alternativa del muestreo destructivo de un par de cuadrantes no es una opción, debido al trabajo físico involucrado, excepto para establecer las relaciones alométricas mencionadas anteriormente. Otros métodos, con más investigación, podrían dar resultados aceptables. Por ejemplo, las imágenes de satélite con una buena calibración en ondas específicas, podrían usarse para delinear las clases de vegetación y usar estas como mediciones del C del suelo.

Estos métodos dependen del uso de datos de campo en la relación actual entre la medida de la vegetación y las reservas de C actuales. En el momento hay solo datos preliminares reportados por un experimento en Maine EEUUA, (Merry y Levine, 1995) aunque la metodología será

investigada por el experimento LBA para su aplicación en la Cuenca Amazónica (ver sección *Experimento a gran escala en la biosfera – atmósfera en la amazonia (LBA)*). Si se puede utilizar para ofrecer resultados aceptables, podría simplificar la extrapolación de mediciones laboriosas en el campo. Mientras el método pueda ofrecer alguna utilidad, debe recordarse que requiere una mayor investigación y validación.

Propuesta de WINROCK

Mientras que el programa de Implementación Conjunta y el Mecanismo de Desarrollo Limpio desarrollan un sistema para el comercio de créditos de C con el fin de contrarrestar las emisiones de los gases del efecto invernadero, los directores de los proyectos necesitarán una metodología confiable para medir los beneficios del almacenamiento en los programas de compensación de C. Por la diferencia entre dos mediciones, separadas por un número de años, pueden certificar que hay una cierta cantidad de C secuestrado.

Dependiendo del nivel de validación científica requerido, la supervisión y la verificación del almacenamiento de carbono puede ser costoso. La empresa Winrock Internacional, (Arlington, Virginia, Estados Unidos), desarrolló una guía o protocolo para medir la cantidad de C en los bosques. La guía de Winrock Internacional describe una metodología económica para la supervisión y la verificación comercial para tres tipos de sistemas de uso del suelo: plantaciones forestales, bosques naturales y sistemas agroforestales. El sistema suministra metodologías de investigación de campo para inventarios a escala comercial para el nivel de precisión exigido por las agencias de financiación.

El sistema de Winrock mide los cambios en los cuatro centros principales de almacenamiento de C: biomasa aérea, biomasa subterránea, hojarasca aérea y hojarasca subterránea. El reto es estimar el cambio neto en cada centro de almacenamiento para las áreas incluidas y no incluidas del proyecto en un intervalo específico de tiempo. A continuación sigue una traducción del resumen de este protocolo “Guía para la supervisión del Almacenamiento de Carbono en Proyectos Forestales y Agroforestales” [*A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects*].

“La supervisión del C exige equipos, métodos y personal capacitado, lo cual puede ser costoso para organizaciones individuales. Esto es especialmente cierto desde el punto de vista que las actividades de supervisión probablemente no se hacen con frecuencia – cada dos a cinco años. En el desarrollo de su sistema de supervisión, Winrock fue consciente de estos costos y ha tratado de minimizarlos. Por esto, el sistema está diseñado para trabajos conjuntos entre una organización con personal bien calificado y organizaciones locales en cada sitio del proyecto.

“El sistema involucra los siguientes componentes:

- determinaciones iniciales de los centros de almacenamiento del C en la biomasa, los suelos y la hojarasca antes de que el proyecto comience.
- establecimiento de parcelas permanentes de muestreo para mediciones periódicas en los centros de almacenamiento de C.
- métodos para el reconocimiento de la vegetación (punto de *cuadrante* y *cuadrante* de muestreo) con el fin de medir el C almacenado en áreas no incluidas en el proyecto o áreas con escasa vegetación.
- cálculo de las diferencias netas del C acumulado en áreas incluidas y no incluidas en el uso del suelo.

- uso de imágenes de satélite SPOT para la determinación de los cambios en el uso del suelo y mapas para un sistema de información geográfica con ordenadores.
- programas para calcular el tamaño mínimo de la muestra asignando puntos de muestreos (de forma sistemática o al azar), determinando el espacio mínimo entre parcelas y optimizando planes de supervisión en sitios específicos.
- modelos de simulación para los cambios en el almacenamiento de C para los periodos entre las mediciones de campo.
- una base de datos de la partición de raíces, tronco y follaje en las especies seleccionadas.

“El sistema Winrock fue cuidadosamente planeado e incluye técnicas de investigación forestal para el inventario de biomasa y hojarasca. Un tema importante es la cuantificación de la variabilidad de la vegetación y del número y tamaño de las muestras necesarias para obtener los niveles requeridos con precisión de la acumulación de C. El sistema Winrock incluye las fórmulas y una hoja de cálculo con las fórmulas para calcular el número de muestras necesarias para un determinado nivel de confianza en los resultados. También tiene una hoja de cálculo que ayuda a estimar los costos para realizar una encuesta, aunque las órdenes de costo en los diferentes niveles de intensidad no están especificadas y no indican la variabilidad que puede esperarse en diferentes situaciones.”

Claramente, las plantaciones forestales serán menos variables que los bosques secundarios y por lo tanto requieren menos muestreos intensivos para un determinado nivel de confianza. Debido a que las plantaciones forestales tendrían un alto nivel de inversión como también mediciones más precisas, serán justificadas para obtener el mayor nivel de retorno esperado en cualquier comercio de créditos de carbono.

Para los bosques secundarios simplemente podrían ser suficientes inventarios de C en el suelo en la época de abandono de la agricultura (Tabla 14). Después de que al bosque se le ha permitido regenerarse por un tiempo límite razonable, por ejemplo 10 años, simplemente sería suficiente medir los diferentes centros de acumulación y estimar la cantidad almacenada. En este caso, la cantidad acumulada será substancial por lo tanto la precisión de la estimación no será crítica.

TABLA 14

Ejemplos de tres niveles para el inventario de C (de MacDicken 1997)

Nivel de esfuerzo	Descripción general
Básico	Da una estimación general a bajo costo del C almacenado en plantaciones. Muestreos menos intensivos permiten bajos costos pero dan estimaciones del promedio de fijación de C con una precisión cerca del 30% de la estimación promedio. Las parcelas de muestreo permanente solo se miden dos veces: al establecimiento de la parcela y al final de la cosecha. El modelaje produce estimaciones temporales de la acumulación de carbono en la vegetación y en los suelos
Moderado	Da estimaciones del C acumulado las cuales están dentro del 20% de los promedios. La intensidad del muestreo es alta y resulta en estimaciones substancialmente más precisas que en un inventario básico. Las parcelas permanentes son supervisadas de cada 2 a 3 años y al final de la cosecha. Los modelos de predicción pueden ser usados para estimar la acumulación anual de carbono pero no podrán ser usados en la mayoría de las aplicaciones.
Alto	Produce estimaciones que son precisas dentro del 10-15% de la cantidad de C secuestrado debido a un incremento en la frecuencia de muestreos y una reducción en el uso de modelos. Las parcelas de muestreo permanente son medidas anualmente.

Las tasas de crecimiento en bosques secundarios, plantaciones o sistemas agroforestales, son suficientemente altas que la intensidad del muestreo propuesta producirá estimaciones aceptables.

Los bosques nativos son un caso diferente debido a que la tasa a la cual un bosque maduro acumulará C, es mucho menor que en las plantaciones.

El Paquete BOTANAL

Los procedimientos para estimar la biomasa aérea y subterránea de comunidades vegetales que no contienen árboles, han sido bien establecidos en agronomía y en las ciencias del suelo.

Con el paquete BOTANAL (Tothill y Hargreave, 1994) se hacen estimaciones rápidas sobre áreas relativamente grandes (hasta 100 ha o más). Brevemente, se establecen escalas visuales para un rango de producción que ocurre en una comunidad y las estimaciones de la producción de ésta se hacen en intervalos regulares. Las estimaciones son traducidas en producción real usando una regresión y así se calcula el promedio de la producción para el área.

El método da excelentes resultados y ha sido ampliamente usado para medir la producción de pastos en experimentos de pastoreo en Australia Tropical y Subtropical en otros países de Asia, Sur y Centro América. El único problema de este método es que las calibraciones tienen que ser establecidas para cada comunidad en consideración. Por ejemplo, la calibración debe hacerse para cada asociación si son formas de crecimiento no similares. Se aconseja establecer calibraciones separadas antes que correr el riesgo de introducir errores.

El BOTANAL se recomienda para obtener datos de pastos en diferentes estados de productividad y para relacionar el vigor del pasto con la cantidad de C acumulado en el suelo. Los agrostólogos en Sur América, que fueron miembros de la Red Internacional de Evaluación de Pastos Tropicales RIEPT, conocen la metodología. Deben promoverse cursos de capacitación para los científicos que realicen estudios para calcular el C en las comunidades no arbóreas en la Cuenca Amazónica.

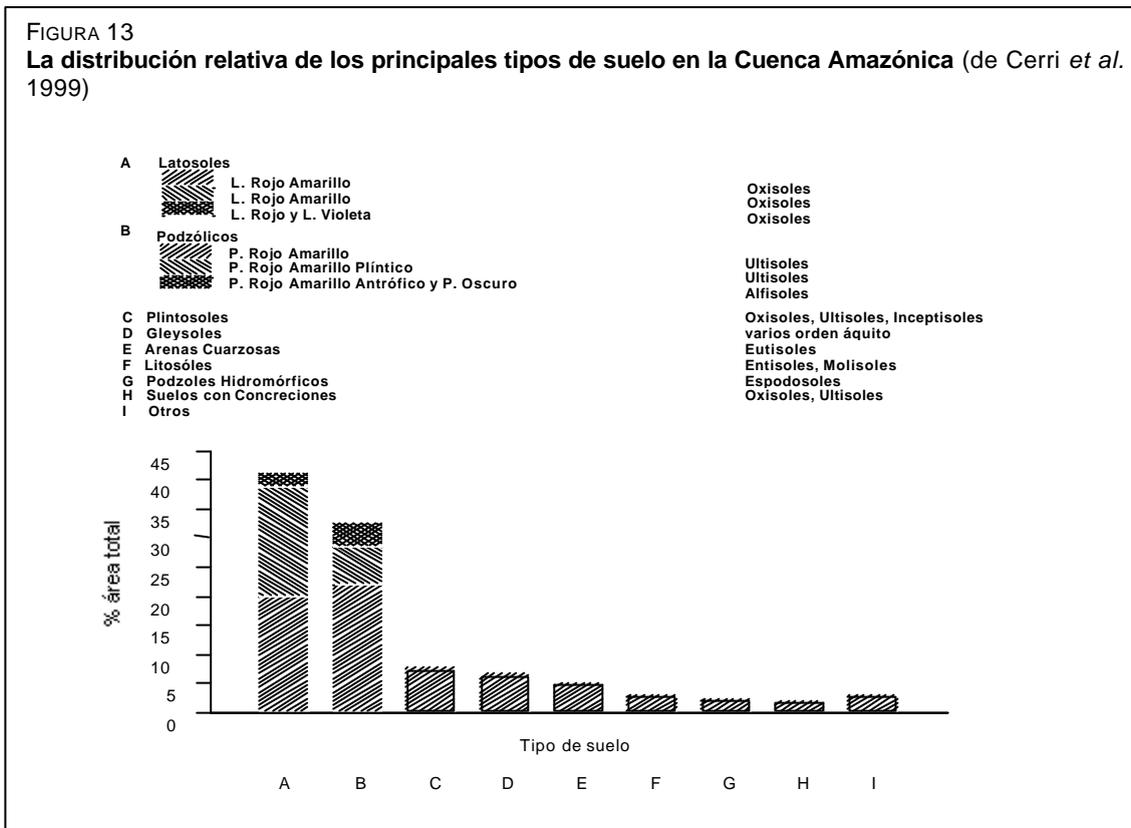
Geoestadística

Cerri *et al.* (1999) usaron una serie de datos “arriados” de perfiles de suelos a nivel continental toda la cuenca amazónica - regional - un cuadrado de latitud 6° por 6° longitud - y local - una finca de 26 000 hectáreas en Rondônia - para estimar el C total del suelo en la Amazonia. En la escala continental las muestras consistieron de datos de 1 662 perfiles recolectados a través de la cuenca. Se calculan el C para capas de 0 – 20 cm y 0 – 100 cm refiriéndose a muestras en un mapa de suelo a una escala de 1: 5 000 000.

Para las escalas regionales y locales se utilizaron mapas de suelos y técnicas geoestadísticas en un total de 796 perfiles para el nivel regional, mientras que para el nivel local los perfiles se examinaron sobre un área de 36 km² de bosque nativo dividido en 500 unidades. El C del suelo fue calculado para capas de 0 – 30 cm y de 0 – 100 cm tanto para el nivel local como para el regional.

El estudio efectuado por Cerri *et al.* (1999), ofrece también datos sobre la distribución de los diferentes tipos de suelo en toda la Cuenca Amazónica (Figura 13). Los Ferralsoles ocupan más del 40% del área total, seguidos por los Acrisoles con un 30%. Los Luvisoles, que son relativamente más fértiles que los Ferralsoles y los Acrisoles ocupan menos del 5% del área. Los Inceptisoles y Molisoles que son importantes para la agricultura, solamente ocupan pequeñas áreas.

Aparte de demostrar el poder de la metodología de geoestadística para analizar datos georeferenciales, Cerri *et al.* (1999) dieron estimaciones globales del almacenamiento de C en el suelo en la Cuenca Amazónica. Si bien las estimaciones no variaron mucho con referencia a los



valores calculados por Moraes *et al.* (1995), se mejoró considerablemente la precisión de las estimaciones (Tabla 15).

TABLA 15
Reservas de C en los suelos de la Cuenca Amazónica

Fuente	Reserva de C (Gt)	Desviación Estándar
Moraes <i>et al.</i> (1995) 0-100 cm	47	11,6
Cerri <i>et al.</i> (1999) 0-30 (mediana)	23,4	-
Cerri <i>et al.</i> (1999) 0-30 (promedio)	27,2	4,5
Cerri <i>et al.</i> (1999) 0-100 (mediana)	41	-

Las estimaciones continentales son calculadas a partir de mapas de suelo y sujetas a errores.

- Precisión limitada de los mapas de suelos sobre los cuales se basan las estimaciones continentales.
- Datos limitados para los suelos de cada unidad en el mapa, menor que 30 perfiles.
- Dentro de cualquier unidad en el mapa, hay considerable variación por textura, lo cual causa grandes cambios en el contenido de C como también en la densidad aparente del suelo. La variabilidad de los suelos en cuanto al contenido de gravas, es también un factor importante. Si a los perfiles de los suelos no les son efectuados muestreos adecuados, la variación estimada basada, puede dar un error importante.
- Según datos históricos hay variaciones en los métodos analíticos del laboratorio. Hasta hace poco la mayoría de los laboratorios usaba el método Walkely – Black, en el cual el C en una submuestra de suelo es oxidado por dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado.

- El calentamiento para la reacción de oxidación ocurre cuando el ácido se diluye por la solución de dicromato. Como consecuencia de esto la oxidación es incompleta, por lo tanto es necesario utilizar un factor de corrección derivado de un número grande de muestras de diferentes suelos. La magnitud con la que se aplica el factor de corrección a cualquier suelo, puede dar errores. La metodología actual utiliza calentamiento externo o un aparato para combustión seca con flujo de oxígeno con el fin de obtener una oxidación completa. En cualquiera de los casos no se requiere el factor de corrección.

Errores Geográficos

Para los cálculos efectuados por Cerri *et al.* (1999), no se tomaron en cuenta las variaciones geográficas debido a la vegetación y al clima. Examinaron los datos de 149 perfiles de suelo de latosoles *rojo amarillo* (Oxisol), para los cuales se conocía su localización. Aunque los sitios se dividieron en tres grupos, no hubo una correlación estadísticamente significativa tanto con latitud como con longitud. El grupo más al sur, tuvo una media y un promedio significativamente mayor que las de los otros dos grupos. Cerri *et al.* (1999) especularon que una estación seca marcada y un bosque menos denso en la región podían ser los responsables de las diferencias.

El problema de escala – cómo aumentar la escala de lotes experimentales hasta regiones y ecosistemas

Siempre hay problemas al extrapolar de un área pequeña - como una parcela experimental, donde la información es muy precisa y por tanto con límites amplios de confianza - a un área de mayor escala. Si el campo es uniforme se puede extrapolar de parcelas experimentales a uno de sus lados. Sin embargo, a medida que aumenta el tamaño de la escala las incertidumbres también lo hacen. Como cuando se inicia la escala a nivel de una finca y luego se amplía a una microcuenca, a la cuenca, a la región, y finalmente al ecosistema, o aún, a todo el planeta. El problema es menos desalentador cuando los datos son aditivos, como lo son para el C y la producción de plantas. Por ejemplo, si una hectárea tiene una producción de 2 t y otra tiene 5 t entre las dos hay 7 t o un promedio de 3,5 t ha⁻¹. Los datos que no son aditivos son los socioeconómicos y por ende son mucho más complicados. Este aspecto se tiene en cuenta en el proyecto actual “Fase de Alternativas para la agricultura de tala y quema” y se discutió en la Sección *Fase III (1999-2002) del proyecto de alternativas a tala y quema (ASB)*.

En el caso del C - o producción - es suficiente saber cuál es el manejo de producción y las áreas a las que corresponden. El problema surge cuando la producción se determina por algún factor que no es aditivo, como el secuestro de C por parte de área en algún punto en particular en el futuro, cuando el uso del suelo y la cantidad de C secuestrado sea determinada por el comportamiento del usuario. Sin embargo, el problema radica solo en la predicción, no en cual será la cantidad actual de C secuestrado cuando llegue el momento.

Como con cualquier problema de muestreo, las metodologías están bien establecidas, ya sea para una parcela experimental o para un área de mayor tamaño. En un área dada se determina el rango y la variabilidad por un muestreo al azar.

Si el área es muy heterogénea, la variabilidad será muy alta y así más muestras deberán tomarse para un determinado límite de confianza (Figura 14, Batjes y Sombroek 1997).

MEDICIONES INDIRECTAS (MODELAJE)

Cochrane *et al.* (1984) describieron 289 sistemas de tierras con un total de 550 facetas separadas en los 5,6 x 10⁶ km² de su proyecto en la Cuenca Amazónica. En un área tan grande como esta,

obviamente no es posible hacer muestreos con la intensidad que se requiere para obtener datos detallados de las reservas de C en cada uno de los sistemas de tierra. Lo mejor que se puede hacer, en un sentido práctico, es seleccionar sitios de referencia que representen suelos y comunidades vegetales. La interpolación y la extrapolación son posibles mediante la aplicación de modelos matemáticos junto con el uso apropiado de sensores remotos y una cierta verificación de los resultados por medio de observaciones de campo.

Modelos matemáticos de simulación

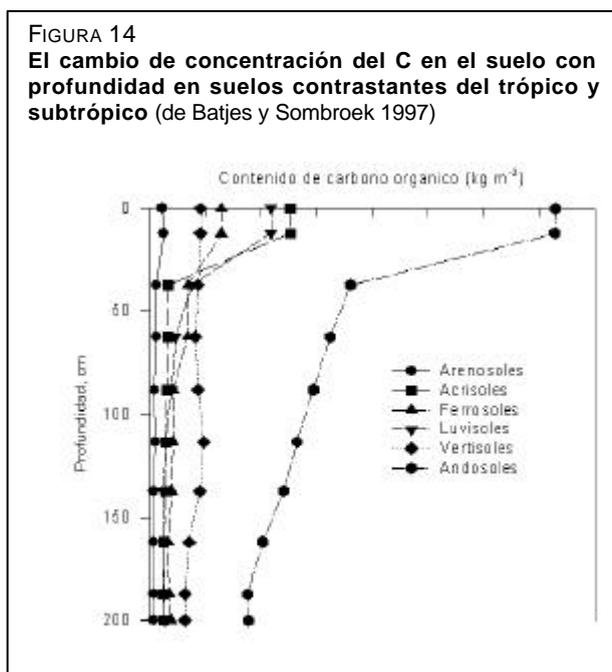
En una zona climática determinada, la productividad de la vegetación es controlada por las características del suelo, tales como drenaje, profundidad, fertilidad, densidad aparente y textura por sus efectos en el suministro de agua a las plantas. Se conocen bien los procesos fisiológicos del crecimiento de los principales cultivos y cómo responden a los principales factores ambientales, tales como agua disponible, N del suelo y temperatura. Estas respuestas pueden ser representadas por ecuaciones matemáticas. Mediante la combinación de las diferentes ecuaciones es posible construir simulaciones matemáticas - o modelos - de los efectos del ambiente en el crecimiento de las plantas.

Cuando los modelos matemáticos comenzaron - más de 30 años atrás - se requerían grandes y costosos equipos y solo se podían hacer en grandes universidades o instituciones gubernamentales de investigación. Hoy los modelos existentes para el crecimiento y producción de muchos cultivos se pueden hacer a un costo moderado, por cualquier persona o instituto que tenga acceso a un ordenador personal.

Modelos para el crecimiento y rendimiento de los cultivos

Para un cultivo en un determinado ambiente, se puede calcular la producción histórica del cultivo utilizando datos climáticos y comparando los resultados con la producción medida del cultivo. Si es necesario se puede ajustar el formato - pero no usualmente la forma - de las ecuaciones internas del modelo para llegar a representar la producción actual. Este proceso se conoce con el nombre de "parametrización". Una vez el proceso haya sido "parametrizado", se utilizan los datos de suelo y climáticos de otro lugar y se estima cuál puede ser su producción - "extrapolación". La confianza con la cual esto se puede hacer depende en que medida el modelo representa los procesos fisiológicos actuales y sus respuestas.

Dado que la mayoría de los cultivos son comunidades de plantas monoespecíficas, el modelaje de los cultivos principales de cereales ha alcanzado un alto grado de precisión y exactitud. Los modelos se utilizan rutinariamente para predecir la probabilidad de la producción, utilizando las bases de datos climáticos con medias y variaciones históricas. También se pueden usar para interpolar entre sitios donde se conoce la producción y para extrapolar, aunque los límites de confianza de los



resultados de sitios distantes no sean similares a los sitios para los cuales el modelo fue parametrizado.

El Programa Internacional Sistema de Soporte para la Decisión de Transferencia de Agro-tecnología (Decision Support System for Agro-technology Transfer, DSSAT) creó modelos de simulación para cebada, yuca, frijol seco, maíz, mijo, pastos templados, maní, la leguminosa forrajera tropical *Arachis pintoi*, papa, arroz y trigo. Otros han usado la capacidad de los modelos para incorporar el conocimiento de las características fisiológicas de otras especies y así utilizar la estructura básica del modelo para producir modelos de crecimiento de las nuevas especies. El ejemplo más reciente es un modelo para el crecimiento del pasto que se cultiva en América del Sur tropical, *Brachiaria decumbens* (Giraldo *et al.* 1998). Esto se considera como un adelanto porque la estructura original del modelo no fue hecha para pastoreo.

Si las respuestas fisiológicas de un cultivo sobre las características del suelo se conocen bien, en principio puede construirse un nuevo modelo con base tanto en el modelo DSSAT para cereales o para leguminosas. Por este medio la producción puede predecirse para cualquier lugar en la Cuenca Amazónica en donde se tengan datos de suelos. Aunque los datos climáticos también son deseables, generadores climáticos están disponibles y pueden ser interpolados con cierta confianza a partir de las redes meteorológicas.

Modelo CENTURY

Tomando el principio de los modelos de los cultivos, Parton y sus colaboradores (Parton *et al.*, 1987, 1988) construyeron un modelo para estimar las reservas de C en el suelo y los cambios que pueden ocurrir en períodos largos, por eso llamado CENTURY. Básicamente, el modelo estima el crecimiento de los cultivos a una escala de tiempo grande utilizando datos climáticos. Los residuos aéreos y subterráneos se dividen en residuos que fácilmente se descomponen y fracciones resistentes que se caracterizan por tasas de recambio lentas. El modelo simula los procesos del suelo cuando la materia orgánica está en tres fracciones: 1) una fracción “activa” que consiste en microorganismos vivos y productos microbiales (de dos a cuatro años de tiempo de recambio); 2) una fracción “lenta” que es más resistente a la descomposición (20 a 50 años de tiempo de recambio) como resultado de la protección química y física; y 3) una fracción “pasiva” que esta físicamente protegida y químicamente resistente y tiene un tiempo de recambio (800 a 1000). Conceptualmente, hay pocas diferencias con el diagrama de Lal *et al.* (1997, Figura 12) y la tabla de Jastrow y Miller (1997, Tabla 13).

En términos de la validación de campo de las predicciones de los modelos, las fracciones de MOS que están entre 53 y 2 000 μm dan una estimación precisa de la fracción lenta, mientras que las fracciones menores que 53 μm corresponden a una fracción pasiva (Cambardella y Elliott, 1992). Al relacionar las reservas funcionales de la MOS a los procesos claves del suelo es fundamental saber la dinámica del secuestro de C en los suelos.

El modelo CENTURY continúa siendo desarrollado y refinado (Parton *et al.* 1987, 1988). La actual versión incorpora las rutinas de la dinámica de la MOS y de los nutrientes, pero se revisa para la simulación de sistemas de rotación de cultivos, incluyendo múltiples cultivos en rotación y una variedad de opciones de manejo como labranza, fertilizantes, irrigación y cultivos de cobertura (Metherell *et al.* 1993).

El modelo CENTURY no representa bien P en los suelos ácidos del trópico (Gjisman *et al.* 1996). Esta es una clara limitación para la aplicación del modelo en la Cuenca Amazónica. Sin embargo, con modificaciones apropiadas la representación parece ser satisfactoria, aunque se

requieren pruebas con los datos actuales de sitios ampliamente separados dentro de la cuenca para verificar esta conclusión.

Ejemplos del uso del modelo CENTURY

El modelo CENTURY ha sido ampliamente usado para simular los cambios históricos de la MOS en suelos cultivados en los Estados Unidos y Canadá, donde la MOS - y por tanto las reservas de C - han caído en un 53% de los niveles pre-agrícolas (Patwardham *et al.* 1997). También se ha usado para predecir los cambios que ocurrirán bajo diferentes sistemas de prácticas de cultivos y aún cambios en el uso del suelo, como por ejemplo los cambios al convertir áreas de cultivos a pastos en el Programa de Conservación de Reservas de los Estados Unidos (Donigan *et al.* 1995 y 1997). En el último ejemplo, los cambios se predijeron de 1990 a 2030 para un área de más de $0,874 \times 10^6$ km² (216 x 106 acres) en el centro de los Estados Unidos, del límite con Canadá al Norte de Arkansas y de los Grandes Lagos al oeste de Colorado.

El estudio de Donigan *et al.* (1997) ilustró la complejidad y el esfuerzo requerido para llevar a cabo las evaluaciones en un área grande, pero menos de una sexta parte del área de la Cuenca Amazónica. Además, contrario a la Cuenca Amazónica, para los estudios de Donigan *et al.* (1997) había buenos datos de la producción histórica de los cultivos en los condados y extensas bases de datos de los tipos de suelo, textura y distribución climática en cada condado. Es importante describir el proyecto con más detalle para enfatizar el tiempo que tomó hacerlo.

La metodología utilizó de dos a cinco divisiones climáticas dentro de cada una de las áreas de producción en la región de estudio, para un total de 80 áreas. Las áreas de producción fueron las áreas espaciales básicas para el estudio, descritas como las áreas hidrológicas definidas por el Consejo de los Recursos de Agua de los Estados Unidos y ajustadas a los límites de los condados. Las áreas de producción eran lo suficientemente pequeñas que se pudo asumir para una "producción homogénea en toda el área". Dentro de las divisiones climáticas establecidas dentro de cada área de producción, los datos mensuales de precipitación total y los promedios de temperatura máxima y mínima requerida por CENTURY fueron promediados sobre una serie de datos disponibles.

Dentro de cada división climática en cada área de producción, la distribución de las diferentes texturas del suelo se estableció utilizando las bases de datos disponibles. También, la rotación actual de los cultivos y las prácticas de labranza se establecieron bajo los sistemas actuales de uso del suelo y las posibles condiciones a la luz de las "condiciones políticas" alternas utilizando un modelo de programación lineal que opera al máximo de ganancias para cada condición política. Hubo 80 posibilidades de rotación de cultivos y labranza, pero se redujeron a 35 mediante la agrupación de cultivos y cultivos secuenciales.

Utilizando la producción histórica de los cultivos desde 1970 hasta 1990 para cada rotación de cultivo y método de labranza dentro de cada división climática, se establecieron condiciones iniciales para la MOS y otras variables requeridas por el modelo. Luego, los modelos se aplicaron a los 40 años de predicción - de 1990 a 2030 - para cada rotación de cultivo y labranza, para cada textura del suelo dentro de cada división climática y dentro de cada área de producción.

Se hicieron miles de simulaciones como parte de la prueba del modelo, calibración y evaluación de las condiciones políticas. Considerando los modelos aplicados a cada una de las 80 divisiones climáticas, con cuatro a seis rotaciones de cultivos y múltiples cultivos, hasta seis tipos de suelos, tres alternativas de labranza y múltiples alternativas políticas, ningún resumen simple puede describir los rangos de las condiciones de los impactos identificados.

El proyecto demuestra la importancia de los modelos matemáticos, basados en la comprensión de los principios de la ciencia del suelo, la fisiología de plantas y la agronomía. A pesar de las demandas de datos de los esfuerzos y costos, los autores fueron capaces de obtener datos sobre los niveles promedios del C en el suelo para un área grande y predijeron cambios que ocurrirán bajo las diferentes condiciones futuras.

Otros modelos matemáticos de simulación de C en el suelo

El modelo CENTURY no es el único modelo disponible para estimar el C en el suelo. Existen otros dos modelos, el modelo de Rothamsted (Jenkinson y Taylor 1977) y el modelo a Largo Plazo de C Orgánico (LTOC, van Veen y Paul, 1981). El modelo de Rothamsted fue primero que el LTOC y CENTURY. Estos últimos se basan en las mismas fracciones que Rothamsted (Cambardella 1997), aunque con distinto nombre (Tabla 16). Los tiempos de recambio son algo diferentes y reflejan las diferentes series de datos que los autores utilizaron muchas funciones de respuestas en las que se basan los modelos.

TABLA 16

Fracciones conceptuales del C del suelo y tiempos promedio de residencia dentro de las fracciones para los tres modelos de C orgánico del suelo

Modelo de Rothamsted*	Modelo a Largo Plazo de C Orgánico**	Modelo CENTURY***
Residuos que se descomponen fácilmente, 0.24 años	Residuos que se descomponen fácilmente, 1 a 2 semanas	Residuos metabólicos, 0.5 años
Residuos resistentes, 3.33 años	Residuos lignificados, 0.3 años	Residuos estructurales, 3.0 años
Biomasa, 2.44 años	Biomasa, 0.5 años	Fracción Activa 1.5-10 años
Físicamente estabilizada, 72 años	Fracción Activa protegida, 29 años	Fracción Lenta 25-50 años
Químicamente estabilizada 2857 años	Fracción Vieja, >3000 años	Fracción Pasiva 1000-1500 años

* Jenkinson y Taylor 1977

** van Veen y Paul 1981

*** Parton *et al.* 1987

Limitaciones de los modelos en general

Se debe enfatizar que las fracciones en la Tabla 16 son conceptos y como tales están simplificados; se derivan de simulaciones de múltiples compartimientos, basados principalmente en relaciones derivadas empíricamente (Cambardella 1997). La verificación de las fracciones conceptuales ha sido posible por la habilidad de los científicos de suelos para aislar fracciones experimentales equivalentes. Sin embargo, colocar el suelo de una manera jerárquica por el aumento de las entradas de energía, parece dar fracciones de MOS que están relacionadas a funciones *in situ* (Cambardella 1997). A su vez, estas fracciones deben dar una redefinición de las fracciones conceptuales y las constantes de las tasas que controlan la transferencia de MOS entre las fracciones. Cuando son incorporadas en los modelos, puede esperarse una mayor precisión funcional que la actual.

En todos los modelos, la representación de la realidad biológica depende de cuatro factores: (1) la precisión de las relaciones funcionales de los modelos para representar el funcionamiento actual del sistema; (2) que el modelo sea aplicado con precaución y que la extrapolación se haga con un conocimiento total de los peligros e y riesgos, (3) que los modelos sean paramétricamente adecuados y verificables para la tarea asignada y (4) que los datos para aplicar el modelo sean precisos y representativos. Las limitaciones de la representación de las fracciones, tanto para CENTURY como para Rothamsted y LTOC, se discutió anteriormente. A pesar de algunas reservas acerca de las relaciones funcionales, éstas no se comportan como una predicción y por lo tanto requieren una precisión aceptable en muchas situaciones.

CENTURY está más orientado a profesionales fuera de los laboratorios de investigación de suelos. Es más fácil de usar, pero requiere un mejor conocimiento de los procesos de la dinámica de la MOS, como también capacitación para su aplicación. No es una herramienta para ser usada por cualquier persona ni por personas que no conozcan las limitaciones mencionadas anteriormente.

Un uso correcto de CENTURY puede dar estimaciones de la dinámica de C del suelo bajo diferentes sistemas de manejo y permite la identificación de los resultados en términos de las respuestas de los agricultores a las condiciones políticas. Sin embargo, para operar al esquema se requiere mejorar considerablemente las fuentes de los datos. Se necesita una serie de datos mínimos sobre tipos de suelos, textura, clima, uso actual e histórico del suelo.

PROBLEMAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ACUMULACIÓN DE C EN EL SUELO

Greenland (1995) resumió los numerosos errores involucrados al estimar el C del suelo global. La concentración de C se determina como la cantidad de este por unidad de peso de suelo. Luego debe convertirse a una cantidad por unidad de volumen para ser aplicado al área y profundidad del suelo en consideración. Las estimaciones para suelos individuales deben ser integradas a una escala mayor, en el caso del Amazonas, a nivel regional. En todos estos pasos hay posibilidades de errores significativos.

Determinación de la Densidad Aparente

La determinación de la densidad aparente a profundidades relevantes involucra errores sistemáticos. Esto se debe principalmente al momento en que se hacen las determinaciones en el laboratorio, mejor que en el campo. Las muestras para laboratorio son terrones o agregados generalmente pequeños. Aunque estas mediciones son precisas, los valores obtenidos son generalmente muy altos porque se ignoran los espacios internos en los agregados. El efecto es una sobreestimación de la densidad aparente de toda la capa que se está estudiando. En este caso, el error está probablemente por debajo de 10% y en dirección opuesta a lo relacionado al C en el suelo y al error sistemático en la determinación química.

Determinación de concentración de C en el laboratorio

Comúnmente, el C del suelo se estima colorimétricamente en la digestión de ácido sulfúrico y dicromato de potasio. En la ausencia de reflujo, el método subestima el contenido de C determinado por combustión seca en un 10 a un 50 %. Se utilizan factores de corrección empíricos (Greenland 1995). Con el reflujo, el error puede ser menor al 10% (ver Sección *Geoestadística*).

La subestimación sistemática puede ser tan alta como del 10 al 30% para la superficie del suelo y mucho mayor para el subsuelo. El problema puede ser importante si las muestras se analizan a diferentes tiempos cuando se usan diferentes técnicas analíticas.

Problemas de profundidad y escala de tiempo

Un mayor error sistemático puede ocurrir debido a la omisión de todo o parte del C en el subsuelo. Muchos suelos tienen cantidades significativas de C en el subsuelo. En las zonas templadas se ha demostrado que el C en el subsuelo es usualmente de mayor edad que en la superficie. Los pocos datos del trópico sugieren que hay un recambio de la MO mucho más rápido, tanto en el subsuelo como en la superficie. Detwiler *et al.* (1985) sugirieron que en suelos previamente bajo bosques, se producen pocos cambios por debajo de 60 cm. Esta conclusión requiere una mejor verificación porque se sabe que hay crecimiento radicular y otras actividades biológicas por debajo de 60 cm y

hasta 1 m en muchos suelos de los trópicos. Los cambios en el C del suelo, a profundidades mayores de 1 m, son más lentos que en la superficie.

Para el contexto de cambios globales, la escala del tiempo debe ser estimada en unidades mayores a las que se utilizan en estudios agronómicos. Lugo y Brown (1986) creen que los períodos de tiempo normales para calcular el logro del estado de equilibrio, en suelos de bosques, son muy cortos - aproximadamente 100 años.

Es necesario mejorar las bases para determinar la profundidad a la cual debe hacerse el muestreo y para los intervalos de tiempo apropiados que deben ser considerados en estudios sobre el balance de C.

Muestreo y extrapolación

Finalmente y más importantes son los errores de muestreo y extrapolación que se hacen al relacionar el C de un horizonte en una muestra determinada de suelo, con áreas de suelos similares y luego integrar esa información a una escala global.

Las muestras de suelos son tomadas con el propósito de hacer inventarios de pedones típicos y no se hace ningún intento para determinar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo (Arnold y Wilding 1991). Los errores de muestreos al azar, en suelo tomado en parcelas bajo estudios agronómicos, son del orden de 10 a 15% para la superficie de suelos, en parcelas establecidas en áreas relativamente uniformes, donde todo el suelo pertenece a una misma serie. El error, utilizando una sola muestra de perfil será muy grande. Esto ha sido ilustrado por Kimble *et al.* (1990) quienes compararon el contenido de MO en 2 715 perfiles de acuerdo con el orden del suelo y demostraron que para cinco órdenes, el coeficiente de variación estaba entre 42 a 71%.

Las diferencias entre suelos de diferentes órdenes o de diferentes grupos dentro de un orden, pueden ser tan grandes como las obtenidas debido a los distintos usos del suelo. El uso de suelo afecta el contenido de C en la superficie del suelo, mientras que la cantidad de éste en todo el perfil será determinada por las características reflejadas en la clasificación del suelo.

Capítulo 4

Actividades sobre secuestro de carbono atmosférico en la Cuenca Amazónica

En este Capítulo se describen principalmente las actividades importantes de institutos investigaciones internacionales y sociales como el IBAMA en la Cuenca Amazónica.

EXPERIMENTO A GRAN ESCALA EN LA BIOSFERA – ATMÓSFERA EN LA AMAZONIA (LBA)

Esta iniciativa es importante para el presente proyecto, y se la describe, incluyendo los antecedentes y un resumen de las propuestas experimentales.

Antecedentes ¹

Los bosques tropicales continúan desapareciendo a pesar de la gran preocupación y del incremento de los esfuerzos internacionales para su conservación. Las preguntas de como la intervención del hombre afecta la capacidad básica de los bosques para regenerarse y como resguardan los procesos ecológicos básicos, tales como la productividad biológica y el ciclo de nutrimentos y agua, son de vital importancia en el manejo del desarrollo sostenible y para la explotación de los sistemas de bosques tropicales. Las alteraciones en los ciclos de agua, energía, C y nutrimentos que resultan de los cambios en la vegetación en la Amazonia tendrán consecuencias climáticas y ecológicas a nivel local, regional y global. Para entender estas consecuencias y para mitigar los efectos negativos se necesita mejorar el conocimiento de las funciones, tanto de los sistemas forestales naturales como de los sistemas que han sido convertidos a otras formas de uso o crecimiento secundario.

Se estima que la población mundial será de 6,2 billones de personas en el año 2000. La mitad, 3,1 billones, vivirá en los países menos desarrollados localizados principalmente en los trópicos entre las latitudes 23^o Norte y 23^o Sur. Las consecuencias del rápido crecimiento de la población en estas zonas se manifestarán en forma de un deterioro del ambiente urbano y en una fragmentación del ambiente forestal.

Datos recientes de un sensor remoto muestran que grandes áreas de la Amazonia Brasileña han cambiado de bosques a pastos y a agricultura. Datos de los bosques tropicales en el sur este de Asia y Africa Ecuatorial también muestran tendencias similares. Actualmente, la conversión de

¹ El texto de esta sección se toma de la sección “Background” del documento “LBA Concise Science Plan”, el cual se encuentra en el enlace <http://yabae.cptec.inpe.br/lba/>.

bosques tropicales primarios a ciertas formas de agricultura y a vegetación secundaria representa uno de los cambios más comunes en el ambiente global.

La Amazonia ha sido habitada por el hombre desde tiempos inmemorables. Se cree que cuando los europeos iniciaron su colonización en el siglo XVI, la población indígena era de varios millones de habitantes. La ocupación de la Amazonia comenzó alrededor de 1540, pero solo al final de la Segunda Guerra Mundial empiezan a observarse cambios en la cobertura vegetal natural. El nuevo período de desarrollo comenzó con las nuevas políticas de los países de la Amazonia, principalmente Brasil, para el desarrollo de la agricultura y el establecimiento de inmigrantes, en su mayoría sin tierras, que venían de áreas altamente pobladas, como por ejemplo de los estados del noreste y sureste de Brasil.

La construcción de las carreteras comenzó a finales de la década del 1950 y continuó hasta la década 1970, abriendo grandes áreas de bosque para el desarrollo agrícola. Millones de inmigrantes partieron hacia la Amazonia. Esto combinado con una política de incentivos fiscales para el establecimiento de grandes establecimientos ganaderos en Brasil, causó un gran incremento en las tasas de deforestación en la Amazonia en la década de 1980. De alguna manera las tasas de deforestación se estabilizaron a comienzos de la década de 1990, pero continuó la presión para el cambio en el uso del suelo, el crecimiento de la población en los países en desarrollo en la Amazonia y los planes para una red de carreteras que cruzaran la región. Aún más, la falta en la Amazonia de una agricultura sostenible, ha forzado a la gente a abandonar sus parcelas agrícolas e irse a la explotación minera - oro, diamantes, casiterita, etc. - en toda la cuenca creando un sinnúmero de áreas de desarrollo espontáneo y de deforestación.

La quema de la biomasa y las alteraciones en el balance del C a lo ancho de la cuenca, que resultan de los cambios en la productividad neta del ecosistema, asociadas con la estabilidad de una nueva y diferente cobertura vegetal después de la deforestación, puede tener muchos efectos significativos. La Amazonia contiene casi la mitad de los bosques tropicales siempre verdes y una gran área de sabanas tropicales. La cuenca es importante en el metabolismo del sistema terrestre, conforme con el 10% aproximado de la PNP de la tierra. Igualmente importante es que la Amazonia es una región de alta biodiversidad. La tala selectiva ha cambiado la estructura y la composición de las áreas de bosques, particularmente en el sureste de la Amazonia y a lo largo del cauce de los ríos. Estas prácticas dan como resultado la fragmentación del hábitat, que conllevan a una pérdida irreversible de la biodiversidad. La atmósfera tropical es responsable de la oxigenación potencial de la tierra. La Amazonia es una importante fuente natural de metano y óxidos nitrogenados.

Utilizando imágenes de satélite (LANDSAT) de alta resolución se estimó la tasa de deforestación en Brasil entre 1978 y 1988. La deforestación - para estrato de bosques - aumentó de 78 000 km² en 1978 a 230 000 km² en 1988 (Skole y Tucker 1993). El área total de un hábitat afectado por deforestación aumentó de 208 000 km² en 1978 a 588 000 km² en 1988. Otra estimación usando una estratificación similar del bosque muestra una deforestación total de 430 000 km² hasta 1991. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 1992).

Todos estos cambios en la Amazonia - que corresponde a un área cerca de 5 millones de km² - tendrían implicaciones climáticas y ambientales para la región, el continente y el mundo.

Resumen del LBA

El experimento a gran escala de la biosfera – atmósfera (LBA) es una investigación conducida por Brasil. El LBA está diseñado con el fin de adquirir el conocimiento necesario para entender la climatología, las funciones ecológicas, biogeoquímicas e hidrológicas de la Amazonia, el impacto de

los cambios en el uso del suelo sobre esas funciones y las interacciones entre la Amazonia y el sistema terrestre. El LBA se centra alrededor de dos preguntas claves que serán consideradas por medio de investigaciones multi-disciplinarias, integrando estudios físicos, químicos, biológicos y en ciencias humanas:

- ¿Cómo funciona actualmente la Amazonia como ente regional?
- ¿Cómo afectarían los cambios climáticos y del uso del suelo a las funciones biológicas, químicas y físicas de la Amazonia, incluyendo la sostenibilidad del desarrollo de la región y la influencia de la Amazonia sobre el clima global?

El LBA hace énfasis en observaciones y análisis que mejoran el conocimiento básico sobre la Amazonia en seis áreas generales: Clima Físico, Almacenamiento e Intercambio de C, Biogeoquímica, Química Atmosférica, Hidrología y Uso y Cobertura del Suelo. El programa está diseñado para estudiar los aspectos principales reconocidos por la Convención Climática. El experimento ayudará a obtener bases para el uso del suelo en la Amazonia, mediante el empleo de datos y análisis que definen el estado del sistema y sus respuestas a las perturbaciones observadas, los cuales serán complementados por modelos que predicen los posibles cambios en el futuro.

En el componente Clima Físico se hacen estudios meteorológicos e hidrológicos a escalas espaciales “anidadas” que van desde parcelas hasta la Amazonia entera, con énfasis para determinar y entender las variaciones espaciales y temporales de los flujos de energía y agua. Las variaciones del clima y las respuestas del sistema Amazónico a éstas, se determinarán desde una escala diaria a una estacional. Los datos de campo generados por un modelo de predicción numérica de tiempo, almacenarán y utilizarán un esquema de asimilación de datos en cuatro dimensiones (4DDA) que serán la herramienta principal para el análisis de las observaciones.

La duración del experimento permitirá hacer observaciones directas de variaciones climáticas anuales, posiblemente incluyendo los efectos del Ciclo Oscilatorio del Niño – Austral. Los datos recolectados en el programa de campo, serán usados para mejorar la representación de los procesos dinámicos claves en los modelos meteorológicos. Los resultados ayudarán a restringir los Modelos de Circulación General usados para examinar las interacciones entre el clima y los cambios de la cobertura del suelo en la Amazonia.

Almacenamiento e Intercambio de C

El componente Almacenamiento e Intercambio de C cuenta con dos puntos principales: (1) ¿Funcionan los ecosistemas no disturbados de la Amazonia como sumideros netos de C? y (2) ¿Cuánto C se pierde como resultado de los cambios en la cobertura del suelo, la deforestación y la tala selectiva?

Las mediciones anuales terrestres del almacenamiento y flujo de C serán efectuadas en sitios estratégicamente ubicados a lo largo de gradientes de usos intensivos del suelo, vegetación y clima complementados con observaciones aéreas y modelaje. Los resultados de los modelos ecológicos se utilizarán junto con sistemas de información geográfica (SIG) a lo ancho de la cuenca para estimar la acumulación de C en la Amazonia. Las observaciones aéreas darán estimaciones de los flujos de C integrada sobre la Cuenca para intervalos cortos de tiempo, como control de los modelos.

Biogeoquímica

El componente biogeoquímica se enfoca en los ciclos de nutrientes y emisiones de gases de invernadero, tanto en bosques naturales y secundarios como en tierras manejadas. Las

observaciones serán hechas por varios años en sitios estratégicos, localizados en gradientes de usos intensivos del suelo y clima, cubriendo un rango de fertilidad de suelo. Las mediciones cuantificarán los flujos de gases - metano y óxido nitroso - de nutrientes - incluyendo pérdidas hacia los ríos - y cambios en las reservas de nutrientes. Estos datos serán complementados con observaciones periódicas aéreas, inventarios en múltiples escalas y experimentos manipulados localmente. Los datos serán unificados en un SIG y unidos a modelos de funciones de ecosistemas. Las claves disponibles serán: el análisis de los efectos del cambio en el uso del suelo y en fuentes de gases de invernadero - énfasis importante de la Convención sobre Cambios Climáticos - diagnósticos de los efectos climáticos y variaciones en el uso del suelo sobre los gases y nutrientes acumulados y la evaluación de las implicaciones de cambios en el uso del suelo sostenible en las dinámicas de los nutrientes bajo diferentes prácticas culturales.

Químico Atmosférico

En el componente químico atmosférico, el enfoque principal será entender la influencia diaria de la Amazonia en las concentraciones tropicales y globales de oxidantes - ozono, radicales hidróxidos - oxidantes precursores - óxidos nitrogenados, hidrocarburos y monóxido de C - y aerosoles, como también complementar los estudios de gases de invernaderos (dióxido de C, óxido nitroso, metano) que se propusieron en los componentes Biogeoquímico e Intercambio y Almacenamiento de C. El diseño experimental combina observaciones terrestres a largo plazo y mediciones aéreas intensivas. Con las observaciones aéreas, se elaborarán mapas del intercambio de gases y aerosoles en la biosfera - atmósfera de la cuenca, complementando las observaciones de campo. Modelos tridimensionales de Química Atmosférica, los cuales usan observaciones meteorológicas asimiladas - obtenidas en el componente Clima Físico - y datos aéreos y de campo, serán aplicados para medir el intercambio de gases y aerosoles entre la Amazonia y la atmósfera global.

Hidrológico

El componente hidrológico considera los puntos relacionados con la cantidad y la química del agua en la Cuenca Amazónica. El almacenamiento y los flujos de aguas, los controles del movimiento de agua en el suelo y arroyos y ríos y el transporte asociativo de constituyentes, se determinarán en cuencas agrupadas que representen un gradiente de intensidades en el uso del suelo. Las cuencas forestales o deforestadas, de varios kilómetros cuadrados, serán equipadas para realizar mediciones con alta resolución temporal de descargas, precipitación, evaporación, intersección y almacenamiento de agua en el suelo, nivel freático, pérdidas y transportes de sedimentos y nutrientes. Se utilizarán los datos para mejorar la eficiencia de los modelos hidrometeorológicos, elaborados para valorar la respuesta del caudal del río Amazonas y de sus afluentes a los cambios climáticos y al uso del suelo. En pequeñas cuencas de cursos de agua de bajo orden se estudiarán los controles en el movimiento de materiales de tierras altas a través de las zonas de ribera y de esos cursos de agua. Por medio de los modelos de acumulación de nutrientes en cuencas mayores se integrarán los resultados de campo con los resultados de los modelos de mayor orden en biogeoquímica de ríos y de los modelos de rutinas hidrológicas de pequeñas cuencas.

Conclusiones

Los cambios en el uso del suelo, en la cobertura vegetal, la conversión de bosques a agricultura y el rebrote subsecuente, serán cuantificados en cuanto a causas físicas y socioeconómicas. Los estudios sobre deforestación y alteración de los bosques serán llevados a cabo empleando sensores remotos e inventarios. Se llevarán a cabo estudios pilotos para ilustrar cómo los cambios en el uso del suelo afectan el mismo. La investigación que definirá los factores externos y las condiciones que

causan esos cambios, se enfocará sobre el desarrollo de modelos de predicción de los cambios en la cobertura del suelo y su uso.

EL LBA combinará herramientas analíticas desarrolladas recientemente, herramientas multidisciplinarias y diseños experimentales, en una síntesis que dará un nuevo conocimiento sobre temas de controversia. El LBA dará el conocimiento necesario para entender los controles ambientales de los flujos de energía, agua, C, nutrientes y gases entre la atmósfera, hidrosfera y biosfera de la Amazonia, que serán las bases científicas para políticas que conlleven al uso sostenible de los recursos naturales de la Amazonia. El mejoramiento en las capacidades de investigación y redes dentro y entre los países asociados con el LBA, ayudarán a la educación e investigación aplicada para el desarrollo sostenible y así en el proceso de formulación de políticas para el desarrollo sostenible de la región.

PROGRAMA PILOTO PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE HÚMEDO BRASILEÑO

Historia del PP-G7

Los informes preocupantes sobre la destrucción del ambiente y fotos de satélites que mostraban la magnitud de la destrucción de los bosques húmedos tropicales a mediados de la década de 1980, alarmaron a la población mundial. Los informes fueron seguidos por una ola de publicaciones científicas: Informe Brandt, Estudios del Club de Roma, la Comisión de Encuesta sobre la Protección de la Atmósfera y otros.

Evaluación y Estado del Programa Piloto

Después de tres años de preparación intensa, todos los sub-programas debían haber salido de la fase de planeación y estar en la fase de implementación en 1996. Como primer paso, se discutió, a nivel nacional e internacional, la compatibilidad del PP-G7 con el ambiente brasileño y los programas económicos que comparten con el Programa Piloto los enfoques en el contenido y/o ubicación. Esto también incluye actividades de los países del G-7 para reducir las emisiones de CO₂ y las mediciones actuales adoptadas para la conservación de los bosques húmedos en otras regiones.

Duración y financiación del Programa

Brasil acordó pagar el 10% de los costos del Programa, principalmente los costos del personal nacional necesario. Para la primera fase del Programa, los países G-7, la Comisión de la Unidad Europea y Holanda aprobaron \$EE.UU. 291,1 millones. De esta cantidad se han pagado \$EE.UU. 58,2 al Fondo de Bosques Húmedos, administrado por el Banco Mundial.

MANEJO INTEGRADO DE LOS BOSQUES NATURALES EN LA AMAZONIA (IBAMA)

En el momento actual los programas de IBAMA no tienen un impacto directo en el secuestro de C atmosférico, pero por sus esfuerzos sociales y de manejo sostenible tendrá posibilidades en el futuro. A continuación se hace una breve descripción de sus principales actividades.

Estado actual de los proyectos bilaterales asociados

La deforestación en la región Amazónica amenaza el suministro regional y mundial de agua y energía. Pone en peligro biotopos únicos, la biodiversidad de la tierra y el ambiente humano. La deforestación es causada principalmente por la ganadería a gran escala, la tala incontrolada y

métodos agronómicos inapropiados. Las técnicas para el uso sostenible de los recursos forestales se han investigado en ciertas regiones y son aplicadas por la población nativa y los recolectores de caucho y nueces de Brasil. Sin embargo, estas técnicas no pueden ser transferidas directamente a otras regiones de la Amazonia.

Demarcación de Territorios Indígenas

De las 368 reservas indígenas existentes, con una población de 140 000 habitantes, cerca de 120 han sido demarcadas y 42 identificadas dentro del Programa Piloto del Bosque Húmedo (PP-G7). Las agencias administrativas brasileñas todavía no han podido cumplir sus compromisos u obligaciones para definir y demarcar territorios indígenas, particularmente debido a que la Fundación Nacional Indígena ha recibido solamente el 10% de los fondos asignados en el último año.

Además, no existen políticas para la protección de la población indígena. Las áreas no protegidas son sujetas a violaciones masivas. En este contexto, la definición legal de propiedad es una necesidad pero no una condición suficiente para la protección. En las reservas establecidas, en donde existe la legislación, no se tienen en cuenta.

Sub-programa de Políticas para Recursos Naturales NRPS

El gobierno brasileño enfrenta varios problemas con el aumento en la destrucción del bosque húmedo Amazónico. Por un lado debe promover el desarrollo económico de las reservas estratégicas de materias primas de la región y administrar la Amazonia como un área compensatoria para conflictos no resueltos sobre la propiedad en otras regiones. Por otro lado, el estado está forzado para reconocer las reclamaciones territoriales de la población indígena como también demandas ecológicamente motivadas para la protección de la región, las cuales no pueden estar en armonía con las funciones mencionadas anteriormente.

Promoción de Comunidades Locales en el Amazonas, Proyectos Demostrativos (PD/As)

El Proyecto colabora con comunidades y organizaciones de pequeños propietarios, caucheros, indígenas y ambientalistas en la Amazonia y en la Región del Mar Atlántico. Esto ayudará a ampliar sus capacidades de desarrollo, a probar métodos novedosos para el uso sostenible de los recursos. Las uniones de comercio de los pequeños propietarios, pescadores, cooperativas pequeñas, representantes indígenas y del clero son ejemplos de los grupos que están interesados en aspectos ambientales y en el uso sostenible de los recursos.

En el momento existe la necesidad de elaborar los informes sobre los proyectos de menor escala, implementados por organizaciones no gubernamentales, grupos comunitarios y entidades estatales y que pueden ser adoptados por otras instituciones. Los grupos comunitarios en la Amazonia - por ejemplo, el Grupo de Trabajo sobre la Amazonia, GTA, que incluye cerca de 300 grupos o el Consejo del Mar Atlántico, RMA, con cerca de 39 grupos - enfrentan dos problemas: por un lado la falta de experiencia y apoyo para representar sus intereses a través de procedimientos oficiales y por otro que las entidades estatales también tienen la oportunidad de trabajar con organizaciones no gubernamentales.

Promoción de un Centro de Tecnología para Producción de Madera en Santarém (CTM)

Grandes áreas de bosques húmedos en el medio del Amazonas están siendo destruidas por la tala. Un grupo importante de usuarios son las pequeñas y medianas empresas en el sector maderero, que

dependen de las grandes compañías exportadoras. La introducción de una norma para producir madera en forma sostenible ha promovido la investigación de nuevos métodos para la producción por parte de las empresas comerciales e industriales que enfrentan la competencia regional, nacional e internacional. No hay todavía estándares ni técnicas sobre cómo usar de una manera sostenible los bosques tropicales.

EL PROGRAMA DE ALTERNATIVAS A TALA Y QUEMA (ASB)

El ASB es un programa global con sitios tanto en Brasil como en Indonesia y Camerún en sus primeras dos Fases (1994-95, 1996-98); en la tercera (1999-2002) también incluye un sitio en Perú. Es un esfuerzo internacional del que vale la pena describir los aspectos más importantes.

Antecedentes

La alta tasa de crecimiento de la población en los trópicos y la alta demanda por tierras para producir alimento y materia prima, resulta en altas tasas de deforestación en los bosques marginales de los trópicos. Los sistemas tradicionales de cambios de cultivos que anteriormente mantenían a la población, sin la degradación de los recursos naturales, están siendo remplazados por sistemas inapropiados de tala y quema.

En los sistemas tradicionales de cambio de cultivos, los agricultores talan y queman pequeñas parcelas de los bosques, y las cultivan durante períodos de dos a cuatro años y luego se desplazan a una nueva parcela. Las áreas previamente cultivadas, son rápidamente colonizadas por las especies forestales. A medida que la densidad de población disminuye y como hay tierra suficiente, los agricultores la dejan en barbecho hasta por 60 años. El corto período de cultivo, seguido por un largo período de barbecho, almacena nuevamente C y nutrimentos en el sistema y facilita la invasión de fauna y flora que es afectada negativamente por el período de cultivo. Los agricultores usan estos bosques para cosechar variedades de fruta, nueces, plantas medicinales y para la caza de animales salvajes.

Como el área de los bosques primarios continúa disminuyendo a nivel mundial, muchos gobiernos han establecido áreas de bosques y parques como reservas. En este caso los agricultores están obligados a talar, quemar y cultivar en tierras con 15 años de barbecho. Como la escasez de tierra aumenta, los agricultores cultivan el área talada por largos períodos, causando una reducción de los nutrimentos del suelo y de las semillas requeridas para la regeneración de la vegetación. Estas áreas degradadas, llegan a ser dominadas por especies agresivas y malezas (Por ejemplo, *Imperata cylindrica*, *Lantana camara*) que obstaculizan la regeneración de las especies forestales. En América Latina, la tala y quema de bosques a gran escala para el establecimiento de pastos, frecuentemente permite la degradación de los pastos, los cuales son abandonados después de seis u ocho años de haberse talado el bosque. Entre 1981 y 1990 la tasa promedio de deforestación global en el trópico húmedo se estimó en 0,1 – 0,14 millones de km² año⁻¹ (FAO 1993). La rápida tala y quema de los bosques y el uso de prácticas agrícolas inadecuadas resultó en millones de hectáreas de suelos degradados, con un aumento de los flujos de gases de invernadero y mayores pérdidas de la diversidad.

Las metas del Programa ASB

En 1994, el Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (*Consultative Group on International Agricultural Research*, CGIAR), con fondos de la Facilidad Ambiental Global (*Global Environment Facility* GEF) y el Programa para Desarrollo de las Naciones Unidas (PNUD), inició un programa mundial de alternativas para la agricultura de tala y quema. El

programa ASB es coordinado por el Centro Internacional para Investigaciones en Sistemas Agroforestales (ICRAF). Su meta es reducir la deforestación causada por la inadecuada agricultura de tala y quema. Los objetivos a largo plazo son: reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, causadas por la deforestación en los trópicos e inadecuada agricultura; aumentar la biodiversidad y conservarla en los bosques; y aliviar la pobreza por medio de la promoción de un desarrollo ecológicamente sano, económicamente viable y agroecosistemas culturalmente aceptables.

El objetivo es mejorar el modo de vida de la población en los bosques marginales, desarrollando y promoviendo sistemas de uso del suelo, diferentes a la agricultura de tala y quema, que sean productivos y lucrativos, pero que también secuestren C y conserven la biodiversidad. El Programa ASB, involucra a los centros de investigación del CGIAR, centros nacionales de investigación, universidades locales, organizaciones no gubernamentales nacionales e internacionales e institutos de investigación avanzada.

La Fase I (1994-95) y la Fase II (1996-98) del Programa ASB

En la fase I (1994-1995), se establecieron tres sitios de referencias en los bosques tropicales marginales en Rondônia, Brasil, Camerún e Indonesia. Se crearon grupos científicos multidisciplinarios, se desarrollaron los protocolos, y se completaron las caracterizaciones de los sitios. Los tres sitios representan un rango de factores biofísicos y demográficos que se encuentran comúnmente en áreas del trópico húmedo. En Brasil, el sitio está ubicado en la región occidental del bosque húmedo de la Amazonia, el cual está sujeto a un rápido desarrollo debido a las condiciones auspiciadas por el gobierno.

Por medio de un manual de métodos de investigación que incorporó técnicas socioeconómicas, ecológicas y agrícolas (Palm *et al.* 1995), se estandarizaron las investigaciones en los sitios. Los protocolos de los métodos del ASB para la estimación de C son resumidos por Woomey y Palm (1999) y Woomey *et al.* (1999) y sus resultados más sobresalientes están resumidos líneas abajo. Estos métodos fueron usados para establecer las bases esenciales de compatibilidad entre los sitios dentro del proyecto y con las áreas estudiadas por otros grupos (como el GCTE). Los balances de C en ecosistemas naturales y agrícolas fueron importantes para el presente proyecto:

- Identificación de nutrientes que limitan la productividad en los agroecosistemas.
- Adaptación del modelo de simulación de carbono en ecosistemas, CENTURY, para los agroecosistemas (ver sección Modelo CENTURY para una discusión de CENTURY y sección *Ejemplos del uso del modelo CENTURY* para un ejemplo de su aplicación).
- Supervisión de los flujos de gases de efecto de invernadero en sistemas naturales y en agroecosistemas.

Se capacitó a colaboradores locales y nacionales dentro de los sitios referencia sobre las mediciones de los flujos de carbono, la biodiversidad terrestre y para trabajar con herramientas en GIS y así desarrollar un conjunto de datos georeferenciados. Se identificaron inconvenientes claves para la producción agrícola, calidad ambiental y uso sostenible del suelo. La tala de bosques es el resultado de la pobreza, inseguridad en los alimentos y conlleva a prácticas de cultivos inapropiadas. Se sintetizaron la información sobre la economía del sistema de cambio de cultivo y la agricultura de tala y quema. Se identificaron las restricciones de las políticas prioritarias para el uso del suelo de manera sostenible. Los análisis de las políticas ambientales actuales confirman que las principales restricciones políticas son:

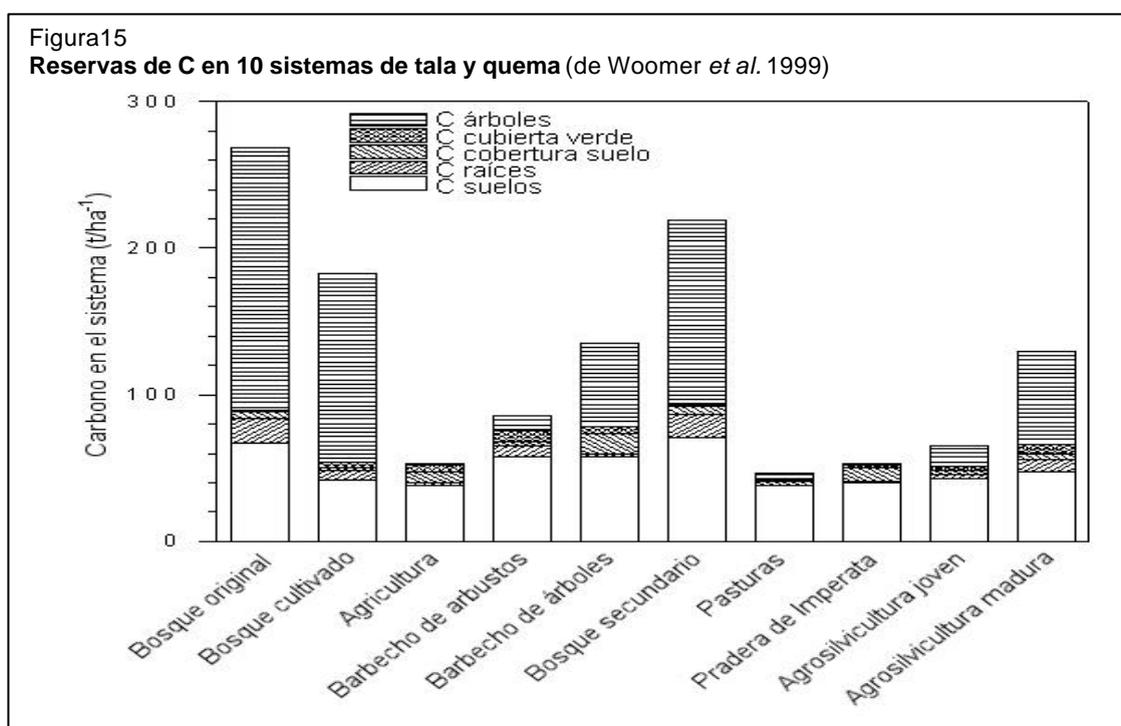
- Colonización y políticas para construcción de carreteras.

- Políticas de impuestos y créditos que favorecen la tala de bosques.
- Política sobre la tenencia de los recursos.
- Términos negativos internacionales para las transacciones en las zonas de bosques húmedos y fluctuaciones en los precios para los principales productos agrícolas, productos de árboles madereros y otras especies.
- Falta de participación de las comunidades locales en el manejo de los recursos naturales.

Los primeros dos puntos fueron únicamente aplicables a Brasil, y los últimos tres puntos se aplicaron a Indonesia y Camerún.

Estimaciones iniciales del balance de carbono

Se midieron en los tres sitios de referencia las reservas de C y los flujos asociados con los diferentes usos del suelo. Las reservas se midieron en 61 sitios y nueve sistemas diferentes de uso del suelo (Figura 15). Las mediciones del flujo de C pueden ser extrapoladas de dos maneras diferentes. Existen inventarios en el uso del suelo en cada sitio referencia con clases que corresponden a los usos del suelo en el cual se hicieron las mediciones de C. Los procedimientos simples pueden derivar una estimación de las reservas de carbono total de cualquier origen. Se identificaron algunos ejemplos de cambios en el uso del suelo con beneficios globales en términos de secuestro de C que son técnicamente confiables y económicamente viables desde la perspectiva del agricultor. En Rondônia, Brasil, los agricultores tienen la oportunidad de trasplantar especies madereras nativas y árboles frutales en los pastos recuperados. Esos sistemas silvopastoriles pueden secuestrar 125 t de C ha⁻¹ en la biomasa de los árboles en un período de 20 años.



Se usaron datos de los sitios referencias para utilizar el modelo de simulación de C en ecosistemas, CENTURY, y ver los efectos y las estrategias alternas para el manejo de suelos, en la dinámica del C en varios períodos. Los ejemplos de los resultados definieron regímenes para los sistemas de manejo de C en Brasil.

Sistema de uso del suelo

Se identificaron “las mejores” alternativas para la agricultura tradicional, tala y quema; fueron identificadas en base en el trabajo de caracterización. Los sistemas de uso de tierra están dentro de las siguientes categorías:

- (a) Bosque Natural
 - (b) Extracción de Bosques
 - (c) Sistemas complejos agroforestales de múltiples estratos.
 - (d) Sistemas simples de cultivo de árboles
 - (e) Sistemas de cultivo / barbecho
 - (f) Sistemas de cultivos anuales continuos
 - (g) Pastos
- Se identificó la “mejor alternativa” para el uso del suelo, para reemplazar sistemas agrícolas de tala y quema.
 - Se diseñó e implementó de una matriz para la síntesis de los diferentes datos recogidos por los investigadores del ASB. Esta matriz facilita el análisis de transacciones entre preocupaciones ambientales, socioeconómicas y políticas relacionando las prácticas alternas de uso del suelo.

Secuestro de carbono y flujos de gases de invernadero

La tala y quema de bosques para la agricultura y la emisión de gases de invernadero de la biomasa terrestre y de los suelos son una pérdida de C. Las emisiones de gases de invernadero después de talar y quemar, dependen de la intensidad del uso del suelo, incluyendo el tipo y la densidad de la vegetación y del uso de labranza y fertilizantes. Las tasas y las magnitudes del secuestro de C y de flujos de gases de invernadero son importantes para evaluar el impacto de las intervenciones en el uso del suelo.

La reserva de C - primeros 20 cm - no varía mucho con los diferentes usos del suelo y hay diferencias significativas en el C aéreo entre los sistemas. Los sistemas de árboles tienen promedios de reservas comparables durante el curso de su rotación.

Para comparar el potencial de secuestro de C en un sistema, es necesario calcular el tiempo promedio de éste en las reservas y el promedio del almacenamiento durante el tiempo de rotación del mismo. Los cálculos indican que los sistemas de uso del suelo, basados en árboles, secuestran cerca de seis veces más C que los cultivos anuales o pastos.

Hay un potencial para el secuestro de C en los suelos a través de la rehabilitación de pastos degradados, pero el potencial de secuestro más grande ocurre en la parte aérea a través de adopción de usos de la tierra basados en árboles. Se indica que todos los sistemas son depósitos de metano siendo los bosques mayores sumideros que los cultivos continuos. La fortaleza del depósito se reduce con incrementos en la intensidad del uso del suelo.

Biodiversidad

Con el incremento en el uso del suelo intensivo y la tala de árboles en Brasil, hay una disminución drástica en el número de especies de lombrices de tierra. Estos cambios pueden tener implicaciones significativas para la productividad del sistema. La disponibilidad de datos sobre la biota del suelo junto con los datos en las reservas de nutrientes y C, dan información que facilita el desarrollo de estrategias de manejo para mejorar la productividad del suelo.

Sostenibilidad agronómica

La sostenibilidad agronómica es una importante interfase para unir los asuntos ambientales globales con la preocupación de los agricultores locales. Los datos sugieren tres indicadores, densidad del suelo, balance de nutrientes y control de plagas y enfermedades que permiten una rápida cuantificación de la sostenibilidad del mejor sistema de uso del suelo.

Preocupaciones socioeconómicas y políticas

No se obtendrá ninguno de los beneficios ambientales con la mejor práctica agronómica, sino existen incentivos socioeconómicos, políticas de intervención y marcos institucionales que faciliten la adopción por los agricultores. Dentro del grupo de pequeños productores sobresalen cuatro resultados:

- Reducir la pobreza (diferente a la seguridad alimentaria).
- Las fluctuaciones monetarias han tenido un impacto significativo en la ganancia relativa de los sistemas alternos del uso del suelo.
- Los agricultores necesitan varias opciones del mejor sistema en un mosaico, si quieren obtener alimentos y monetaria.
- Existen transacciones o prebendas entre secuestro de carbono, biodiversidad, y liquidez de los pequeños agricultores. Esta información permite, a quienes toman decisiones, evaluar estrategias para la ubicación de los recursos basados en el retorno económico local y en los servicios ambientales globales para dar guías de como y donde actuar los cambios por vía política, incluyendo inversiones en expansión del uso tecnologías.

Fase III (1999 – 2002) del Programa de Alternativas a Tala y Quema (ASB)

El enfoque en las primeras dos fases fue a escala de parcela y de finca. En la tercera fase se propone aumentar las evaluaciones de los mejores sistemas para efectos complejos y no aditivos de los mosaicos a escala de cuencas hidrológicas y del relieve.

Las actividades propuestas para la Fase III son:

1. desarrollar métodos que integren los asuntos biofísicos y socioeconómicos de los sistemas de uso del suelo a nivel del relieve
2. predecir el impacto de adopción de las mejores opciones a nivel de relieve
3. analizar las políticas y reformas institucionales necesarias para apoyar las mejores opciones
4. probar las mejores opciones de uso del suelo con el fin de mejorar la viabilidad de los mejores portafolios del ASB
5. aumentar la competitividad de las extrapolaciones del trabajo del ASB mediante la adición de sitios claves de referencia.

A lo largo de los trópicos, el manejo de los sistemas mosaico en el uso del suelo por agricultores y comunidades da como resultado interacciones complejas y no aditivas. El programa ASB propuso para su tercera fase aumentar sus actividades a nivel de cuencas hidrológicas y de relieve, con el fin de contestar las preguntas de los aspectos biofísicos, sociales, económicos e institucionales relacionadas a los ecosistemas mosaico sostenibles. Se preguntaron cuáles serían las prácticas del uso del suelo que mejor maneje las preocupaciones tanto económicas como ambientales mientras al mismo tiempo son viables institucionalmente.

1. Entender y predecir los efectos a nivel de relieve. No es simple extrapolar del nivel de finca a escalas espaciales mayores mediante la adición de los efectos a nivel de finca porque los componentes de los mosaicos de agricultores y facetas del relieve actúan de una manera compleja y no aditiva.
2. El uso de suelo mosaico da las diferentes funciones a nivel familiar y comunitario, cada una con sus propias metas y necesidades. La dinámica a corto y largo plazo de estos sistemas mosaico y sus componentes están afectados por factores sociales complejos, económicos, institucionales y biofísicos.
3. El uso del suelo mosaico tiene impactos directos e indirectos en un rango de diferentes funciones de los agroecosistemas y el efecto determina la sostenibilidad social y ecológica dentro de una región y del relieve.
4. Las dudas de los legisladores regionales y nacionales involucran factores diferentes a las dudas de los pequeños agricultores o a las de grupos ecológicos internacionales.

Los métodos para trabajar a escala de parcela y finca y a escala regional - GSI, sensores remotos - están bien desarrollados. Sin embargo, hay un número de métodos - disminuir o agrandar la escala - que necesitan ser mejorados para agroecosistemas complejos y para el manejo de estos ecosistemas por comunidades a nivel de cuencas hidrológicas y del relieve. Por ejemplo, la emisión neta de gases de invernadero a la atmósfera será influenciada por las interacciones espaciales y temporales de las fuentes y reservorios a nivel de terreno. Uno de los retos clave es el desarrollo de métodos y la extensión de las bases de datos para medir estos fenómenos a nivel de cuencas hidrológicas y relieve. Un número de atributos de las prácticas de uso del suelo sigue una regla de escala relativamente fácil y una vez utilizada a nivel de parcela puede ser aumentada fácilmente a una unidad de área. La producción de cultivos y las reservas de C parecen estar en esta categoría. Para otras funciones, las reglas aditivas no pueden ser usadas y deben emplearse otras formas de interacción.

El programa ASB ha empezado a estudiar el potencial de las mejores opciones para la recuperación de tierras degradadas y reforestadas en el trópico húmedo. Si estos millones de hectáreas pueden volverse productivas, reduciría la presión de deforestación en los bosques primarios. Claramente se necesitan normas que aseguren la propiedad de la tierra y de los árboles, para facilitar la recuperación por parte de los pequeños agricultores. Esto no es suficiente para promover las opciones. Existe una serie de opciones tecnológicas para transformar el sistema en otros de producción de árboles, pero el apoyo técnico ayudaría también a facilitar el proceso de adopción y reducir los riesgos. Como las quemadas son parte del problema, se requiere de instituciones a nivel rural, antes que los agricultores comiencen a invertir en sus propiedades.

El papel de los bosques tropicales marginales para el secuestro de C, es un tema controvertido. Un mayor número de datos ayudarían a resolver el conflicto. Los resultados de la Fase I y II, indican que las tasas de recuperación de la vegetación después de tala y quema, pueden ser más rápidas que las estimadas previamente. Se necesitan más mediciones en vegetación secundaria joven para confirmar lo anterior. Los datos son esenciales para verificar la existencia de modelos que son usados para cuantificar el impacto de usos alternativos del suelo.

Los trabajos en los sitios existentes en Pucallpa, Perú, han contribuido a los datos de ASB. El sitio de Pucallpa está dentro de la parte superior de Cuenca Amazónica y se diferencia del sitio de Brasil en topografía, tendencias demográficas y políticas gubernamentales. Pucallpa es un sitio medio con colonización espontánea tanto de áreas urbanas como de los Andes. Una base de datos sobre usos alternativos del suelo, cerca al sitio, en Yurimaguas, es un suplemento útil al conjunto de

datos. El centro eco-regional hospeda los consorcios CIFOR, CIAT e ICRAF, trabajando a nivel de relieve.

UNIVERSIDAD ESTATAL DE CAROLINA DEL NORTE, YURIMAGUAS, PERÚ

Durante varios años hubo un gran esfuerzo cooperativo de investigaciones entre el proyecto de suelos tropicales (USAID) y el Instituto Nacional de Investigación y Promoción Agropecuaria del Perú (INIPA) en Yurimaguas. Se demostró que los sistemas de cultivos y pastos fueron sostenibles en el largo plazo. Los datos de Smythe y Cassel (1995), en la Tabla 17 y Figura 16, muestran que los pastos pueden manejarse de manera de dar valores altos y constantes de peso vivo de animales, que es el parámetro más sensitivo que indica degradación. Aunque los datos son para los años 1984 – 1988, el pastoreo continuo comenzó en noviembre de 1980 dando al pastoreo alternativo en 1981 y 1982 para ver la tendencia del componente leguminoso a dominar la gramínea como frecuentemente lo hace en el trópico húmedo (Tabla 18).

TABLA 17

Asociación gramínea/leguminosas y manejo de pastoreo en un experimento de pastoreo en un Ultisol en Yurimaguas, Perú (de Lara *et al.*, 1991, citado por Smythe y Cassel)

Asociación	Pastoreo		Tiempo de Pastoreo años	Carga	
	Continuo	Alterno		Mín	Máx
Gramínea/Leguminosa	--Fecha de Iniciación--			Animales ha ⁻¹	
<i>Brachiaria decumbens</i> / <i>Desmodium ovalifolium</i> (Bd-Do)	15 Nov., 1980	6 Oct., 1982	9	4,4	5,5
<i>B. humidicola</i> / <i>D. ovalifolium</i> (Bh-Do)		10 Oct., 1982	7	4,4	6,6
<i>Centrosema pubescens</i> 438 (Cp)	15 Nov., 1980	6 Oct., 1981	9	3,3	4,4
<i>Andropogon gayanus</i> / <i>Stylosanthes guianensis</i> (Ag-Sg)	15 Nov., 1980	6 Oct., 1981	9	3,3	5,5
<i>A. gayanus</i> / <i>C. macrocarpum</i> (Ag-Cm)		1 May, 1985	5	3,3	4,4

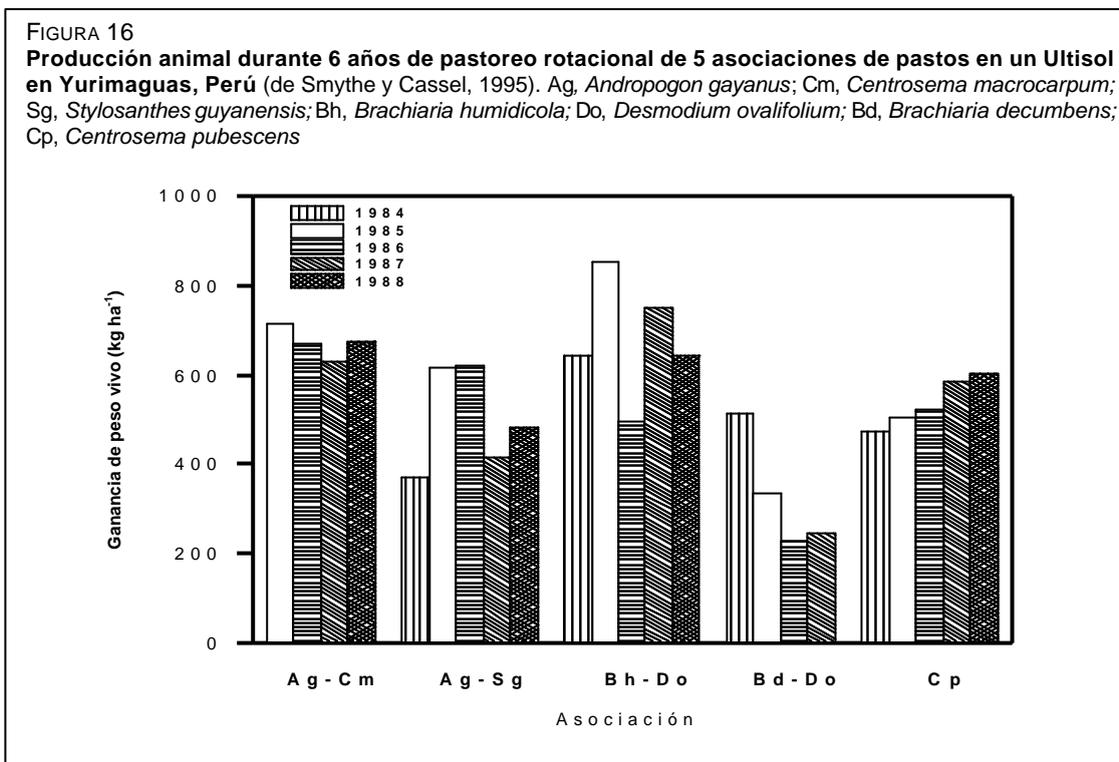
TABLA 18

Cambio en la proporción de leguminosas en cinco pastos gramínea/leguminosa bajo pastoreo en un Ultisol en Yurimaguas, Perú. (De Lara *et al.*, 1991 citado por Smythe y Cassel, 1995)

Año	Asociación				
	Bd-Do	Bh-Do	Ag-Sg	Cp	Ag-Cm
	----- leguminosa -----				
1981	54	--	25	42	--
1982	56	--	28	91	--
1983	66	50	40	100	--
1984	--	29	8	100	--
1985	27	31	50	100	14
1986	23	44	41	100	34
1987	13	61	9	100	32
1988	5	52	9	100	36

Se usaron datos de los sitios de referencias para utilizar el modelo de simulación de C en ecosistemas, CENTURY, y ver los efectos y las estrategias alternas para el manejo de suelos, en la dinámica del C en varios períodos de tiempo. Los ejemplos de los resultados definieron regímenes para los sistemas de manejo de C en Brasil.

Los datos son para asociaciones que sin embargo necesitan otra década de investigación en el manejo, al menos el componente leguminosa. *Brachiaria humidicola* sería siempre aceptada como una buena opción, pero *Brachiaria brizantha* podría ser sustituida por *B. decumbens* y *A.*



gayanus. Las leguminosas usadas en este experimento han sido superadas por *Arachis pintoi*, que ha mostrado ser exitosa en los experimentos en Florencia, en el trópico húmedo de Colombia.

Lamentablemente hay pocas mediciones en la literatura para la acumulación de C bajo pastos bien manejados. Si los datos para los Oxisoles en los Llanos Orientales de Colombia pueden tomarse como una guía, entonces esos pastos pueden acumular desde 3 hasta 10 t/ha/año mínimo.

Capítulo 5

Acuerdos internacionales para el secuestro de carbono atmosférico en los países amazónicos

UN RESUMEN DEL DESARROLLO DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, Estocolmo, 1972¹

En 1972 se llevó a cabo la Conferencia sobre el Medio Humano en la ciudad de Estocolmo. En ese momento, el movimiento ambiental fue novedoso y marcó el comienzo de la concienciación hacia el medio ambiente en la comunidad internacional. En ese entonces no había mayor preocupación por los problemas ambientales, incluso en los países industrializados, las preocupaciones eran solamente sobre contaminación de aguas y aire. Incluso en los Estados Unidos, uno de los países más preocupados por los asuntos ambientales, la Agencia de Protección Ambiental tenía solamente dos años de existencia. Los tratados internacionales que ya existían eran sobre recursos naturales compartidos como la Antártica o el mar abierto. No existía ningún cuerpo formal donde los países discutieran asuntos ambientales.

El logro más importante de la Conferencia fue la Declaración de Estocolmo, una declaración de principios, sin fuerza jurídica obligatoria: “inspirar y guiar los pueblos del mundo en la preservación y mejora del ambiente humano”. El Principio 21, que ahora tiene fuerza jurídica obligatoria en la ley internacional, sostenía que un estado era responsable de cualquier actividad dentro de sus fronteras si cruzan a otro estado y causan daños. El Programa de las Naciones Unidas Medio Ambiente (PNUMA), que enfoca los problemas del medio ambiente a nivel global, fue creado en la Conferencia de Estocolmo.

En 1987, la Comisión Mundial sobre el Ambiente y Desarrollo informó a la Asamblea General el tema del desarrollo sostenible que se define como “el desarrollo para satisfacer las necesidades de la generación actual sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras para satisfacer las propias necesidades.”

Convención sobre Cambios Climáticos

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambios Climáticos (CMNUCC) fue adoptada por la Asamblea General de la ONU el 9 de mayo de 1992 y se expuso para ratificación en la

¹ <http://infoserver.ciesin.org/docs/008-585/unced-intro.html>; The United Nations Conference on Environment and Development: Process and Documentation by *Shanna L. Halpern*

Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD) en junio de 1992. La Convención tuvo fuerza jurídica obligatoria a partir del 21 de marzo de 1994, 90 días después de la confirmación de la quincuagésima ratificación. Hasta ahora ha sido ratificada por 176 países.

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD)¹

La Asamblea de las Naciones Unidas encargó un estudio de cuatro años a la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (CMMAD) [World Commission on Environment and Development, WCED], la cual presentó el informe de sus labores en el año 1987. El informe se basó en el tema del desarrollo sostenible, es decir, desarrollo “conforme con las necesidades de la generación presente sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.” La Asamblea General aprobó el informe de la CMMAD y exigió al Secretario General organizar una conferencia sobre el medio ambiente veinte años después de la Conferencia de Estocolmo. La Asamblea General estuvo de acuerdo para que la Conferencia pudiera “elaborar estrategias para parar y reparar los efectos de degradación del medio ambiente, promoviendo el desarrollo sostenible y ecológicamente sano en todos los países. Esta reunión se llamó Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD) en contraste con la Conferencia de Estocolmo la cual estuvo enfocada solamente al “Ambiente Humano”.

El “Desarrollo Sostenible” surgió para acomodar las diferencias entre el medio ambiente y desarrollo. Sin embargo, generó polémica desde un comienzo. Los países desarrollados querían que todos los estados tomaran acción para proteger el ambiente global, mientras que los países en desarrollo insistían en que esto significaba que los países que habían contaminado el medio ambiente buscando su propio desarrollo, ahora exigían al resto de países pagar por los errores que ellos habían cometido.

La CNUMAD se realizó en Río de Janeiro del 3 al 14 de junio de 1992, con la participación de 178 países y la asistencia de más de 100 jefes de estado. Asistieron más de 1 000 Organizaciones no gubernamentales y muchas de ellas se desempeñaron en sesiones específicas como consultores formales. Cinco instrumentos fueron aprobados por consenso en la CNUMAD, reflejando un compromiso político. De los cinco instrumentos, tres son importantes para el tratamiento y estudio de la temática de bosques:

- (A) La Declaración de Río de Janeiro sobre Medio Ambiente y Desarrollo;
- (B) La Declaración autorizada, sin fuerza jurídica obligatoria, de principios para un consenso mundial respecto al manejo, conservación y desarrollo de los bosques de todo tipo; y,
- (C) El Capítulo 11 de la Agenda 21.

Los tres documentos son importantes para el desarrollo sostenible. La Declaración Autorizada (Principios Forestales) menciona el C como parte de un grupo de productos y servicios que los bosques pueden proveer. El Capítulo 11 de la Agenda 21 es más específico, incluye el papel del secuestro de C en la sección B en donde se anuncia “Aumento de la protección, manejo sostenible y conservación de todos los bosques y aumento de la cubierta vegetal en las tierras degradadas, mediante la rehabilitación, la forestación, la reforestación y otras técnicas de restauración”.

¹ *Ibid.*

Declaración de Río de Janeiro sobre Medio Ambiente y Desarrollo¹:

“Este instrumento es considerado como una suerte de Carta Magna de la problemática ambiental”. Su aprobación fue consensual y mediante una resolución de la Conferencia, carece de fuerza legal compulsiva, constituye una suerte de normas morales a tenerse en cuenta en la formulación y cristalización del derecho internacional”.

“Ello se deriva de la parte preambular de la Declaración, donde los países y las organizaciones internacionales, reconocieron que la Conferencia de Río tuvo como objetivo establecer una nueva y equitativa alianza mundial mediante la creación de nuevos niveles de cooperación entre los Estados, los actores claves de las sociedades y las personas²”.

Declaración autorizada, sin fuerza jurídica obligatoria, de principios para un consenso mundial respecto al manejo, conservación y desarrollo sostenible de los bosques de todo tipo:

- 2 (b) “Los recursos y las tierras forestales deberían ser objeto de un manejo sostenible con el fin de atender las necesidades sociales, económicas, ecológicas, culturales y espirituales de las generaciones presentes y futuras. Esas necesidades se refieren a productos y servicios forestales, como madera y productos de la madera, agua, alimentos, forraje, medicamentos, combustible, vivienda, empleo, esparcimiento, hábitat para la fauna y flora silvestres, diversidad en el paisaje, sumideros y depósitos de carbono, y se refieren asimismo a otros productos forestales.....”

Capítulo 11 "Lucha contra la Deforestación", de la Agenda 21:

El secuestro del C es reconocido en la sección B del Capítulo 11, como sigue a continuación:

- B. Aumento de la protección, manejo sostenible y conservación de todos los bosques y aumento de la cubierta vegetal en las tierras degradadas, mediante la rehabilitación, forestación, reforestación y otras técnicas de restauración
- 11.13 Los gobiernos deberían reconocer la importancia de clasificar los distintos tipos de bosques, bajo una política a largo plazo de conservación y manejo de los recursos forestales, y determinar en cada región o cuenca unidades sostenibles a fin de velar por la conservación de esos recursos.
- (d) Llevar a cabo actividades de repoblación vegetal, cuando sea posible, en zonas montañosas, tierras altas, tierras desnudas, tierras de labranza degradadas, tierras áridas y semiáridas y zonas costeras, para luchar contra la desertificación, evitar los problemas de erosión y facilitar otras funciones de protección y programas nacionales para la rehabilitación de tierras degradadas, incluidas la silvicultura comunitaria, la silvicultura social, la agrosilvicultura y el pastoreo forestal, teniendo en cuenta al mismo tiempo la función de los bosques como depósitos y sumideros de carbono en el plano nacional;
- 11.14 Entre las actividades de gestión deberían figurar la reunión, la recopilación y el análisis de datos e información, así como la realización de estudios de referencia.

¹ Todo el texto de la Declaración de Río de Janeiro sobre el Medio Ambiente y Desarrollo se encuentra en los apéndices.

² Layzequilla, A.F. (1995). Antecedentes y negociaciones internacionales en curso respecto a los bosques o forestales. En *Propuesta de Criterios e Indicadores de Sostenibilidad del Bosque Amazónico*. Secretaría Pro Tempore, Lima, Perú. Pp. 77-82.

- (e) Compilar y analizar datos de investigación sobre la interacción especie-lugar de las especies utilizadas en los bosques artificiales y evaluar las posibles consecuencias de los cambios climáticos para los bosques, así como los efectos de los bosques en el clima, e iniciar estudios a fondo sobre el ciclo del carbono en relación con diferentes tipos de bosques, a fin de proporcionar asesoramiento científico y apoyo técnico;
- 11.15 El reverdecimiento de zonas adecuadas es una tarea de importancia y repercusiones de alcance mundial.
- (b) Coordinar las investigaciones regionales y subregionales sobre la absorción del carbono, la contaminación del aire y otros problemas ambientales.

ACTIVIDADES BAJO LAS CONFERENCIAS DE LAS PARTES DEL CMNUCC

COP-1 Conferencia de las Partes 1 Berlín

La primera Conferencia de las Partes de la CMNUCC se llevó a cabo en la ciudad de Berlín del 28 de marzo al 7 de abril de 1995. Además de considerar asuntos importantes relacionados con la futura Convención, los delegados acordaron lo que muchos creían que era el asunto central en frente del COP-1, es decir, la importancia de los compromisos o el “Mandato de Berlín”. El resultado fue establecer un Grupo *Ad Hoc* para el Mandato de Berlín (GAMB), que adelantaría actividades apropiadas para después del año 2000, incluyendo refuerzos en los compromisos de las Partes para la adopción de un protocolo u otro instrumento de fuerza legal obligatoria.

COP-1 también solicitó al Secretario hacer los arreglos para las sesiones del Cuerpo Subsidiario de Ciencia y Asistencia Técnica (CSCAT) en coordinación con el Cuerpo Subsidiario para la Implementación (CSI). La CSCAT serviría como enlace entre las determinaciones científicas y tecnológicas; la información sería suministrada por instituciones competentes internacionales y las necesidades del COP serían políticamente orientadas.

Durante el proceso GAMB, el CSCAT consideró varios asuntos incluyendo el manejo y tratamiento del Informe de la Segunda Evaluación (ISE) del Comité Intergubernamental sobre los Cambios Climáticos. El ISE se creó para dar recomendaciones que ayudarán al COP a revisar y evaluar la aplicación de la Convención y para la preparación y ejecución de sus decisiones. El ISE también se refirió a varios asuntos claves durante el proceso de GAMB, como a las comunicaciones nacionales y las actividades conjuntamente implementadas.

Actividades de Implementación Conjunta (AIC)

Artículo 4, Compromisos, Párrafo 2 “Las Partes que son países desarrollados y las demás Partes incluidas en la CMNUCC se comprometen específicamente a... (a)... adoptar políticas nacionales y tomar las medidas correspondientes de mitigación del cambio climático, limitando sus emisiones antropogénicas de gases del efecto invernadero y protegiendo y mejorando sus sumideros y depósitos de gases. Esas Partes podrán aplicar tales políticas y medidas conjuntamente con otras Partes y podrán ayudar a otras a contribuir al objetivo de la Convención...”

En el Artículo 4.2 de la CMNUCC se permite las Actividades de Implementación Conjunta (AIC) antes del COP-1 como parte del Mandato de Berlín. El AIC es un mecanismo que permite a los países desarrollados y en transición a un mercado económico cumplir sus compromisos bajo la convención.

La Implementación conjunta, dada por el Artículo 4.2 (a) del CMNUCC incluye cooperación entre los países, para alcanzar las metas de la Convención. Un país financia las acciones para reducir las emisiones en otro, que son adicionales a las reducciones que de otra manera ocurrirán.

Después de la COP-1, los proyectos pilotos están siendo llevados a cabo en la aplicación de actividades conjuntas por algunos países. Las ventajas y desventajas económicas de las propuestas de implementación conjunta han sido ampliamente discutidas. En sí, hay tres papeles posibles para la implementación conjunta: (i) como una opción costo-efectivo para que los países desarrollados puedan financiar la reducción de las emisiones de gases de invernadero en otros países, al mismo tiempo que cumplen sus necesidades de desarrollo; (ii) como el primer paso hacia el establecimiento de un sistema de cuotas internacionales para los gases de invernadero entre las partes que se han comprometido a limitar sus emisiones y (iii) como un medio para explorar cuánto es el costo-efectivo y traer o llevar las nuevas fuentes de emisión o sumideros a un sistema internacional de manejo de gases de invernadero.

La motivación para la implementación conjunta es que, tanto países vendedores o compradores se benefician de la transacción. Sin embargo, en el caso (i) la supervisión y los altos costos de las transacciones pueden llegar a ser un problema en el uso de la implementación conjunta como un medio para lograr reducciones en el costo-efectivo de las emisiones de gases de invernadero. También de acuerdo con los tratados internacionales actuales, los inversionistas en proyectos de implementación conjunta no pueden todavía acreditar las reducciones de las emisiones mediante estos proyectos, en contra de los compromisos nacionales durante la fase piloto.

COP-3 Conferencia de los Partes 3 Kyoto

El grupo *Ad Hoc* sobre el mandato de Berlín (GAMB) se reunió ocho veces entre agosto de 1995 y el COP-3 en diciembre de 1997. Durante las primeras tres sesiones, los delegados se concentraron en analizar e imponer posibles políticas y en medir los compromisos de las Partes de la CMNUCC, de cómo los países de la CMNUCC podrían compartir nuevos compromisos y si éstos deberían ser tomados como una forma de adición o Protocolo. GAMB-4, la cual coincidió con la COP-2 en Ginebra en julio de 1996, completó un análisis profundo de los elementos de un Protocolo, en donde los estados aparecen listos para preparar un texto de negociación. En la GAMB-5, la cual se reunió en diciembre de 1996, los delegados reconocieron la necesidad de decidir si permitía o no mecanismos que dieran a las Partes de la CMNUCC flexibilidad para la limitación de las emisiones cuantificadas y las reducciones objetivas (QELROs),

Cuando el Protocolo estaba siendo escrito durante la sexta y séptima sesiones del GAMB, en marzo y agosto de 1997 respectivamente, los delegados revisaron el texto mediante la convergencia o eliminación de algunas de las muchas actividades repetidas dentro de las numerosas propuestas presentadas. La mayor parte de la discusión se centró en una propuesta de la Unión Europea, la cual incluía una reducción del 15% en los niveles de emisión de 1990 de tres gases del efecto invernadero, para el año 2010. En octubre de 1997, cuando el GAMB-8 comenzó, el presidente de Estados Unidos hizo un llamado para “una importante participación” de los países en desarrollo en la posición negociadora anunciada por él en Washington.

La conferencia de se llevó a cabo del 1 al 11 de diciembre de 1997 en la ciudad de Kyoto, Japón. Más de 10 000 participantes asistieron a la conferencia, incluyendo representantes de gobiernos, organizaciones no gubernamentales y la prensa. La Conferencia incluyó una parte de alto nivel en la cual más de 125 Ministros de Estado hicieron presentaciones. Las Partes del CMNUCC adoptaron el Protocolo de Kyoto el día 11 de diciembre, después de una semana y media de negociaciones intensivas, tanto formales como informales.

El Protocolo de Kyoto

En el Protocolo de Kyoto, las Partes de la CMNUCC se comprometieron a reducir entre los años 2008 y 2012 sus emisiones totales de los seis gases que causan el efecto invernadero (GEI) al menos en un 5% por debajo sus emisiones en 1990. El Protocolo también establece comercio de emisiones en el Artículo 17. En el Artículo 6, se estableció, “Actividades de Implementación Conjunta” (AIC) entre los países de la CMNUCC y un “Mecanismo de Desarrollo Limpio” en el Artículo 12, para fomentar proyectos bilaterales entre países de la Convención y países de la CMNUCC.

En el párrafo 3 de Artículo 2 del Protocolo se definen los llamados “Bosques de Kyoto”. Este párrafo específicamente excluye los sumideros terrestres diferentes de los Bosques de Kyoto, es decir, “... la actividad humana directamente relacionada con el cambio del uso de la tierra y la silvicultura, limitada a la forestación, reforestación y deforestación desde 1990, calculadas como variaciones verificables del carbono almacenado en cada período de compromiso...” Las consecuencia de esta limitación es la exclusión de cualquier sumidero diferente a los bosques de forestación - áreas que antes no tenían bosques - y áreas de reforestación (bosques secundarias). Pero el bosque primario no es elegible, ni los suelos en los sistemas agrícolas ni en otros sistemas no forestales. Los pastos, por ejemplo, no son incluidos sin tener en cuenta si ocupan tierras que anteriormente fueron bosques.

Implementación Conjunta

El Artículo 6 del Protocolo de Kyoto formalizó el establecimiento de la Implementación Conjunta. Su concepto es parecido a la fase piloto de la AIC aprobado como parte del Mandato de Berlín, descrito anteriormente. La provisión clave está en el párrafo 1 “Para efectos del cumplimiento de los compromisos contraídos en virtud del Artículo 3, toda Parte incluida en la CMNUCC podrá transferir a otra de esas Partes, o adquirir de ella, las unidades de reducción de emisiones resultantes de proyectos encaminados a reducir las emisiones antropogénicas de las fuentes o incrementar la absorción antropogénica por los sumideros de los gases del efecto invernadero en cualquier sector de la economía...”

“La otra provisión clave está en el párrafo 3, la cual permite a otros cuerpos diferentes de los gobiernos participar, aunque el gobierno en cuestión debe asumir la responsabilidad: “Una parte incluida en la CMNUCC podrá autorizar a personas jurídicas para que participen, bajo la responsabilidad de esa parte en acciones conducentes para la generación, transferencia o adquisición, en virtud de este artículo, de unidades de reducción de emisiones”.

Mecanismo de Desarrollo Limpio

El Artículo 12 del Protocolo de Kyoto da una alternativa, no descrita en detalle, y conocida como Mecanismo de Desarrollo Limpio. El Protocolo exigió conferencias subsiguientes de las partes con el fin de elaborar los procedimientos para que el mecanismo opere. En efecto, la elaboración se la dejaron a los cuerpos subsidiarios para que hicieran las recomendaciones. Aunque el Protocolo exigió que fueran consideradas las “modalidades y procedimientos” en la siguiente COP (Buenos Aires) no se hizo y por lo tanto no hay un mecanismo operacional.

El intento de los párrafos 9 y 10 del Artículo 12 es abrir el MDC a otras entidades diferentes a los gobiernos y hacer que cualquier crédito después del año 2000 sea elegible para incluirlo en el primer período de compromisos (2008-2012).

Párrafo 9: Podrán participar en el mecanismo para un desarrollo limpio, en particular en las actividades mencionadas en el inciso a) del párrafo 3 supra y en la adquisición de unidades certificadas de reducción de emisiones, entidades privadas o públicas, y esa participación quedará sujeta a las directrices que imparta la junta ejecutiva del mecanismo para un desarrollo limpio.

Párrafo 10: Las reducciones certificadas de emisiones que se obtengan en el período comprendido entre el año 2000 y el comienzo del primer período de compromiso podrán utilizarse para contribuir al cumplimiento en el primer período de compromiso.”

Reuniones de FCCC¹ Post Kyoto:

Los cuerpos subsidiarios de la FCCC se reunieron del 2 al 12 de junio de 1998 en Bonn, Alemania. Estas fueron las primeras reuniones formales de la FCCC desde la adopción del Protocolo de Kyoto. El SBSTA-8 acordó dar las conclusiones sobre *inter alia*, cooperación con organizaciones internacionales relevantes, los asuntos metodológicos y sobre la educación y capacitación. El SBI-8 alcanzó conclusiones sobre *inter alia*, comunicaciones nacionales, mecanismos de financiación y la segunda revisión de la adecuación de los Comités de las Partes de la CMNUCC. En su sexta sesión, el AG13-6 concluyó su trabajo sobre las funciones de los Procesos Multilaterales Consultivos (PMC). Después de unir SBI/SBSTA y de extensos debates de los grupos de contacto sobre los mecanismos de flexibilidad, los delegados solamente se pusieron de acuerdo en un documento que contenía las propuestas de los G-77/China, la de la Unión Europea y la los Estados Unidos sobre los asuntos para discusión y los marcos de trabajo para su aplicación.

Políticas para reducir fugas y evasores

¿Puede un país o un grupo de países ser efectivos en contrarrestar la emisión de gases de invernadero con una política unilateral? La respuesta depende de cómo los otros países responden a las políticas aceptadas por los países en cooperación. Estas respuestas a su vez reflejan dos fenómenos: “fuga” y “evasión”. La evasión ocurre cuando los países que se benefician de contrarrestar los efectos nocivos, comparten los costos. La fuga ocurre cuando las acciones para contrarrestar los efectos por los países en cooperación, causa emisiones en otros países.

Políticas para reducir emisiones de gas

Los países tendrán incentivos para reducir las emisiones hasta que hasta que la participación en una política internacional para el manejo de los gases de invernadero siga siendo voluntaria. Ninguno de los modelos empíricos existentes ha sido usado para estimar la magnitud del potencial de emisión pero tampoco se han explorado incentivos para los beneficios de una cooperación total. La estabilidad del grupo de países que cooperan para controlar el efecto invernadero, dependerá de la habilidad que estos tengan para sancionar a los países que se retiren y para recompensar a los que se unan.

Para que las sanciones y los reconocimientos sean efectivos, deberán ser tanto substanciales como acreditables. Un ejemplo de estas sanciones es, la amenaza de vetar el comercio de combustibles hidrocarbonados y productos a los países no cooperadores, cuando un gran número de estados estén dispuestos a participar en la sanción (SAR III, 11.6.4.1).

¹ Framework Convention on Climate Change (FCCC): Marco de Trabajo para la Convención sobre Cambio Climático

Políticas para reducir las emisiones de gas

La emisión es el resultado neto de un número de efectos, que interactúan entre ellos. En primera instancia, la implementación de una política para disminuir las emisiones de C por parte de un país o de un grupo en cooperación, podría aumentar el comercio de mercancías de C hacia otros países y así incrementar las emisiones en éstos. Segundo, las acciones de mitigación pueden disminuir la demanda mundial por combustibles hidrocarbonados y reducir el precio mundial de estos combustibles, incrementando así su uso en países participantes. Tercero, las acciones para contrarrestar las emisiones pueden afectar las divisas en países en cooperación y así reducir las importaciones de otros países que a su vez pueden bajar sus divisas y emisiones. Cuarto, los flujos de inversión y tasas de cambio también pueden ser afectadas con impactos impredecibles sobre las emisiones.

La fuga se mide en términos de emisiones netas de gases del efecto invernadero relativas a la reducción de las emisiones de países en cooperación; las emisiones varían ampliamente (SAR III, 11.6.4.2). ¿Qué se puede hacer para reducir las fugas de emisiones? Las teorías de las transacciones básicas sugieren que - cuando se trata a los países en cooperación como una sola entidad y el resto del mundo como otra - debe ser impuesta una tarifa a los productos de C importados o que las exportaciones deben ser subsidiadas dependiendo de si los países en cooperación son netos importadores o exportadores antes de que las acciones de mitigación sean implementadas. Otra opción puede ser, implementar en los países en cooperación un subsidio de producción - impuesto - y un impuesto de consumo - subsidiado - en vez de la tarifa de importación - subsidio de exportación.

La aplicación de ajustes de impuestos, tales como las tarifas de importación o los subsidios de exportación que son teóricamente apropiados, conllevan a una serie de problemas prácticos. Determinar las emisiones asociadas con la manufactura de un producto en particular, será muy complejo debido a las diferencias en las mezclas de combustibles y técnicas de producción utilizadas en las distintas regiones. Además, el ajuste de impuestos puede no ser compatible con las reglas de transacciones multilaterales corrientes. De igual manera, la implementación de subsidios de producción o de consumo y de impuestos al nivel apropiado en todos los países en cooperación y dadas las diferencias en sus sistemas de impuestos respectivos, es prácticamente imposible.

COP-4 Conferencia de las Partes, Buenos Aires, 2 de noviembre a 13 de noviembre de 1998

El principal aspecto del COP-4 fue el anuncio de Argentina en el que se comprometía a aceptar las mismas condiciones de los países de CMNUCC bajo UNFCCC. Hasta el momento, ningún país ha sido excluido de los compromisos legales en el Artículo 4.2, sus párrafos (a) y (b), al menos que ellos voluntariamente escojan ser incluidos (ver Artículo 4.2, subpárrafo (g)) "Cualquier país que no haya sido incluido en la CMNUCC podrá, en su instrumento de ratificación, aceptación, aprobación o acceso, notificar al depositario que intenta ser parte del subpárrafo (a) (I) (b).

Propuesta de Tarapoto. Propuesta de criterios e indicadores de sostenibilidad del bosque Amazónico

En febrero de 1995, un grupo de funcionarios de alto nivel y expertos internacionales se reunieron en Tarapoto, Perú. En esta reunión se hizo una lista de criterios y indicadores para la sostenibilidad del bosque de la Amazonia. Los representantes de ocho países amazónicos

recomendaron que sus respectivos gobiernos deberían de adoptarlos. El documento se conoce como la “Propuesta de Tarapoto”.

En este la introducción a la lista de criterios e indicadores trajo a colación los compromisos asumidos bajo el texto del Capítulo 11 de la Agenda 21, la Declaración de Río, la Declaración Autorizada y el mandato establecido bajo el Tratado de Cooperación Amazónica, en la cual “Las Partes Contratantes convienen en realizar esfuerzos y acciones conjuntas para promover el desarrollo armónico de sus respectivos territorios amazónicos, de manera que esas acciones conjuntas produzcan resultados equitativos y mutuamente [beneficiosos], así como para la preservación del medio ambiente y la conservación y utilización racional de los recursos naturales de esos territorios.”

Se seleccionaron doce criterios, cada uno con un cierto número de indicadores de sostenibilidad. Luego los criterios fueron agrupados en una de las tres categorías de escalas diferentes. Las escalas van desde el nivel de unidad de manejo hasta el nivel nacional y global. En este último es donde se menciona el secuestro de C.

A continuación se encuentra la lista de criterios. Dentro cada criterio se enumeran los indicadores que presumiblemente eran potencialmente útiles más que prioritarios en orden de importancia. En algunos casos el indicador parece ser más un juicio de valor que una valoración objetiva, p. ej. “Marco político y jurídico apropiado que estimule el desarrollo sostenible,” o, “Políticas y marco jurídico para el manejo ambiental a través de la zonificación ecológica-económica”.

Criterios a nivel nacional

- Beneficios socioeconómicos
- Políticas y marco jurídico e institucional para el desarrollo sostenible de los bosques producción forestal sostenible
- Conservación de la cobertura forestal y de la diversidad biológica
- Conservación y manejo integral de los recursos de agua y suelo
- Ciencia y tecnología para el desarrollo sostenible de los bosques
- Capacidad institucional para fomentar
- El desarrollo sostenible amazónico

Criterios a nivel de unidad de manejo

- Marco jurídico e institucional
- Producción forestal sostenible
- Conservación de los ecosistemas forestales
- Beneficios socioeconómicos locales

Servicios a nivel global

- Servicios económicos, sociales y ambientales del bosque amazónico. El único indicador relevante al presente documento es el (b) y posiblemente la ciencia en el (g).
 - b. Contribución al balance global de carbono.
 - g. Contribución a la economía, la salud, la cultura, la ciencia y la recreación.

Capítulo 6

Elaboración de una estrategia para la medición, análisis y negociaciones sobre el secuestro del C

LA ESTRATEGIA BÁSICA

La estrategia básica consta de seis mandatos principales:

- ⇒ **Proteger** el bosque primario no intervenido.
- ⇒ **Incrementar** la producción actual en los bosques intervenidos.
 - **Integrar** sistemas de cultivos y pastos.
 - **Promover** sistemas agroforestales y silvopastoriles productivos.
- ⇒ **Promover** la generación de bosques secundarios en tierras sobrantes y degradadas.
- ⇒ **Restablecer** las tierras abandonadas.
- ⇒ **Medir y documentar** las reservas de C en los diferentes sistemas.
- ⇒ **Capacitar** programas nacionales para promover el secuestro de C.

En todos los casos, la estrategia debe operar a través de incentivos económicos, donde sea necesario o deseable por instrumentos legales, que busquen equidad, que sean técnica y administrativamente correctos y políticamente viables, para un secuestro de C atmosférico certificable y verificable.

- ⇒ **Continuar la negociación** en foros internacionales para asegurar términos favorables de los créditos de C, tanto en acuerdos bilaterales como en el mercado abierto.

PROTEGER EL BOSQUE PRIMARIO

Proteger y preservar el bosque primario maduro existente. Documentar sus reservas de C y cualquier aumento que ocurra por medio de la selección cuidadosa de sitios típicos de referencia permanente en las principales clases de bosques y en suelos dominantes dentro de las diferentes zonas climáticas.

Phillips *et al.* (1998, discutido en la sección *Bosques primarios*) sugiere que los bosques amazónicos no intervenidos están secuestrando $0,62 \pm 0,37 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Si este valor se aplica en términos generales, entonces todos los bosques de la Amazonia son sumideros muy grandes de C atmosférico. No es claro por cuanto tiempo los bosques maduros pueden continuar secuestrando C, pero puede ser por muchas décadas, especialmente si las concentraciones de C atmosférico continúan aumentando a las tasas actuales. No solo por esta sola razón se justifica proteger y/o mantener los bosques intactos, sino también porque conservan carbono y secuestran el C.

TABLA 19

Resumen de las estrategias para proteger y/o restaurar el vigor de las tierras sujetas a diferentes usos. Existen diferentes estrategias para ser adoptadas dependiendo del vigor de la tierra

Uso del Suelo	Indicador	Vigor	Acción
Bosques primarios	Ningún signo de intervención	Excelente	Proteger contra la intervención y quema. Periódicamente medir las reservas de C en áreas representativas seleccionadas.
	Usado para la extracción de productos no madereros	Muy bueno	Proteger contra la quema. Mantener la extracción de productos no madereros y asegurar condescendencia, supervisión periódico del vigor y medición de las reservas de C en áreas representativas seleccionadas.
Tala selectiva y sostenible	Intervalos prolongados para mantener una adecuada biomasa, diversidad y vigor	Regular a Bueno	Proteger contra las quemaduras. Supervisar la extracción de madera y asegurar condescendencia. Periódicamente supervisar y medir las reservas de C en áreas representativas seleccionadas.
Tala selectiva pero no sostenible	Intervalos muy cortos o severos de tala para mantener una adecuada biomasa, diversidad y vigor	Regular a pobre	Proteger contra las quemaduras. Proteger contra la tala hasta que la recuperación de la biomasa y la biodiversidad sea al menos buena después de la fase de uso (5-7 años).
Tala y quema continua. Uso para la agricultura luego pastos y bosques secundarios (pequeños agricultores)	Todos o casi todo los árboles talados y quemados	Pobre a muy pobre	Permitir la regeneración de bosques secundarios por lo menos por 20 años. Opción: regeneración definitiva.
Pastos productivos	Carga > 1 cabeza/ha, GPV > 200 g d	Muy buena a excelente	Mantener un buen manejo. Integrar con cultivos.
Pastos degradados	Carga < 1 cabeza/ha, GPV < 100 g d	Pobre a muy pobre	Recuperar el pasto y mejorar el manejo. Regenerar bosque secundario.
Agricultura productiva	Rendimientos altos y estables	Muy buena a excelente	Mantener un buen manejo. Diversificar los cultivos e integrarlos con pastos.
Agricultura de baja productividad	Rendimientos bajos y disminuyendo	Pobre a muy pobre	Regenerar bosque secundario.

Si se lleva a cabo la explotación de bosques primarios debe ser sostenible y benigna, ó sea que no debe causar ningún daño a corto o largo plazo. Los daños a largo plazo son difíciles de detectar en una escala de tiempo corta, pero con el tiempo pueden ser más importantes. La explotación insostenible o la explotación que causa cualquier daño debe ser finalizada por instrumentos legales fuertes y rigurosos.

MEJORAR LOS ACTUALES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN ÁREAS DE BOSQUES INTERVENIDOS

Intensificar, diversificar e integrar la producción en sistemas sostenibles y hasta donde sea posible regenerar bosques secundarios a largo plazo o bajo una explotación sostenible o enriquecer y diversificar los bosques.

Con pocas excepciones, la producción *actual* es alarmantemente baja, una pequeña fracción de la *producción alcanzable* (para una discusión de los conceptos *de producción actual, alcanzable y potencial*, ver la discusión de Ingram y Fernandes, 1999 en la sección *Controles principales de la formación de la MOS*). La mayoría del ‘desarrollo’ parece ser impulsado por el encarecimiento de la tierra más que por objetivos claros de una agricultura productiva y eficiente (Smith *et al.* 1997). Los sistemas agrícolas productivos son posibles como lo demuestra la experiencia de Yurimaguas en la Amazonia Peruana (ver sección *Universidad Estatal de Carolina del Norte, Yurimaguas, Perú*). La mayoría de los agricultores practican alguna forma de agricultura de la tala y quema (Toledo 1997), mientras que los grandes ganaderos convierten la

tierra a pastos para ganadería, que en su mayoría están en algún grado de degradación. Se estima que el 70% de las tierras intervenidas están en producción ganadera y el resto está en agricultura por pequeños agricultores (Fearnside y Barbosa 1998).

Tipos de intervención y su impacto

La Tabla 20 es un intento para resumir los efectos de los sistemas de uso del suelo como sumideros o fuentes de C. Como se explicó en el pie de la tabla, las áreas taladas, por definición, pierden la mayoría o todo su C aéreo cuando la vegetación se quema o cuando se requema para limpiar el suelo. La tabla solo considera las perspectivas de acumulación de C en el sistema a partir de este punto.

TABLA 20

Tipos de intervención en tierras de bosques y sus influencias en la absorción o pérdida de C corto o largo plazo

Clasificación de la Intervención	Ejemplo	Impacto de C*		
		Corto Plazo	Largo Plazo	
Bosques	Ninguna	Bosques primarios no intervenidos en áreas remotas	+	?
	Comenzando	Bosques primarios para extraer productos madereros	0	0
	Uso sostenible	Extracción de maderas a tasas sostenibles, sin tener en cuenta la forma óptima del árbol y sin dañar los demás árboles y el suelo	-	0
		Bosques secundarios a largo plazo (40 o más años)	+++	+ o ?
	Uso no sostenible	Tala y quema en ciclos largos (20 o más años)	++	0
		Extracción de madera a intervalos cortos, con daños a los demás árboles	----	--
	Tala y quema en cortos intervalos	----	--	
Áreas Taladas **	Uso sostenible	Sistemas Productivos y uso del suelo bien manejados (sistemas de producción integrada, hortalizas, mosaicos, sistemas agroforestales y silvopastoriles, pastos bien manejados)	+	
			a	+ o ?
	Uso no sostenible	Pastos degradados o en degradación	--	--
	Poco dañados	Fácil y económicamente recuperables	---	-
	Altamente dañados	Recuperación económicamente dudosa	----	---
Severamente dañados	Sin recuperación económica posible	----	----	

* Corto y Largo plazo (menos de y mayor a 20 años, respectivamente) absorción o emisión de C. Entre mas signos, + o -, mayor será el impacto, positivo o negativo respectivamente. 0 = no se espera ningún impacto, ? = Ligeramente positivo

** Todas las áreas taladas han perdido, por definición, la mayor parte o el total del C de la parte aérea en el momento de la tala. Después pueden perder los impactos a corto plazo.

Convencer a los agricultores el cambio de agricultura de tala y quema por sistemas más productivos y sostenibles

Con la excepción de fases de barbecho largos - más de 40 años, aunque algunos autores se refieren a bosques secundarios maduros a los 25 años, (Smith *et al.* 1997), existen evidencias que la agricultura de la tala y quema no es sostenible (Toledo 1997). La producción después de la tala inicial es suficiente, pero disminuye rápidamente y es típicamente abandonada después de dos o posiblemente tres cultivos para volver a barbecho o la siembra de pastos (Smith *et al.* 1997). En el último caso, la productividad disminuye en cuatro o seis años y finalmente es abandonada. Las

evidencias de Fearnside y Guimarães (1996, discutidas en la Sección *Bosques secundarios*) sugieren que la recuperación del bosque secundario después de pastos para ganadería es más lenta que en áreas en agricultura abandonadas.

Muchos factores socioeconómicos influyen en el mosaico de usos del suelo en sistemas de agricultura. Sin embargo, estos factores raramente no son aditivos como se discute en el resumen del proyecto ASB en la sección *Fase III (1999-2002) de ASB*. En general, las formas para entender las interacciones a este nivel requieren un mayor desarrollo y análisis. Se espera que un mejor conocimiento de la naturaleza de las decisiones de los agricultores permita una mayor influencia para la adopción de prácticas sostenibles.

La quema es el componente más perjudicial del sistema que la emplea. El programa SHIFT en el oriente de la Amazonia Brasileña ha desarrollado una trituradora que reduce las especies de barbecho a cobertura donde se siembra el cultivo. De esta manera se tiene un mayor retorno de nutrientes, un mejoramiento en la MOS y una mayor flexibilidad para los agricultores cuando el ciclo de cultivo tiene que unirse a los cortos períodos que le permite quemar la vegetación de barbecho. Este trabajo es importante como una opción sostenible para pequeños agricultores.

Algunos valores servirían para mostrar la falta de sostenibilidad económica de la agricultura de tala y quema. Además de la madera que contiene y de que su valor depende de si es o no comercial, una hectárea de bosque tiene poco valor en los mercados domésticos (Smith *et al.* 1997). Sin embargo, contiene un promedio de 132 t C en la parte aérea y quizás 100 o más en el suelo, para un total de 232 t C (Cerri *et al.* 1994).

El colono tala y quema el bosque. Cerca del 25% del C aéreo se libera a la atmósfera en ese instante; la mayoría del C restante se libera por descomposición a medida que el colono limpia la tierra en los siguientes años. Además del 20%, o más, del C del suelo se perderá durante la fase de cultivo cuando el colono produce un total de tres toneladas de grano en dos cultivos y 500 kg de ganado en los siguientes seis u ocho años (250 kg de carcasa o cerca de 130 kg de carne o su equivalente en leche). Pero esas tres toneladas de grano y 130 kg de carne cuestan 170 toneladas de C, más el valor de la mano de obra del colono para talar, quemar, cultivar y lo que invierte en el ganado. La tierra tiene un valor comercial quizás de \$EE.UU. 100 (Smith *et al.* 1997). Si el C tiene un valor de \$EE.UU. 10 por tonelada, el bosque tiene claramente un mayor valor de lo que la tierra produce, descontando la mano de obra del colono y su valor comercial 'mejorado'.

Promover la integración de los sistemas actuales de cultivos y pastos

Promover la adopción de las tecnologías disponibles para sistemas sostenibles y productivos. Promocionar sistemas de producción diversificados para disminuir los riesgos y asegura ingresos, como los sistemas cultivos/árboles/pastos. Promocionar y promover sistemas de cultivos y pastoreo para producir sistemas más estables y sostenibles.

En lugar de agricultura de tala y quema y pastos degradados, promover la tecnología conocida para el uso sostenible del suelo, usando políticas fiscales y promoviendo servicios extensionistas. Haciendo esto habrá más alimento y fibra en menor cantidad de tierra. El objetivo es crear sistemas productivos que sean social, económica, ambiental y biofísicamente sostenible.

Es obvio pensar que el aumento o disminución de las reservas de C en el suelo, después de la tala del bosque, depende del manejo de los sistemas subsecuentes. Los científicos aceptan frecuentemente que las prácticas del manejo de los cultivos y pastos son muy deficientes en la Amazonia. Serrão *et al.* (1996) indicaron que hay suficiente información y conocimiento para la

creación de sistemas sostenibles, incluyendo policultivos y monocultivos en tierras de bosques ya talados y la promoción de prácticas de manejo sostenible para bosques secundarios, las cuales incluyen el establecimiento de plantas con valor económico, si bien no especifican qué plantas podrían ser.

La capacidad de los pastos para secuestrar carbono

Nepstad *et al.* (1991) demostraron que en pastos bien manejados establecidos en áreas previamente con bosque, el sistema radicular puede redistribuir el C a capas más profundas en el suelo, donde es menos vulnerable a la descomposición. Esta es una posibilidad de secuestrar C en el suelo que anteriormente estaba en los bosques (Fearnside y Barbosa, 1998).

Fisher *et al.* (1994, 1998) también demostraron que las gramíneas con sistemas radiculares profundos pueden secuestrar grandes cantidades de C, 75 a 95% en profundidades de 20 cm. La tasa de acumulación de C parece estar controlada por el estatus de N del pasto (Fisher *et al.* 1998).

Sin duda los pastos vigorosos pueden recuperar algo del C perdido mediante la acumulación de MO que puede ser profundo en el perfil del suelo. Cualquier actividad así sea cultivo o renovación de pastos causa pérdida de C acumulado en las capas de suelo disturbadas por el cultivo. Sin embargo, en el caso de estos pastos donde la mayoría de la acumulación de C es por debajo de la capa de labranza, las pérdidas deberán ser mínimas.

Inevitablemente debe haber un límite para la cantidad de MOS que puede ser acumulada, a medida que la tasa de la pérdida de C aumenta con los incrementos de las concentraciones atmosféricas hasta que finalmente las tasas de las pérdidas por el proceso de descomposición se acerque a la tasa de entrada. Sin embargo, no se conoce cuál es el valor del nuevo equilibrio. Obviamente, si hay un valor de equilibrio y si la tasa de entrada es mayor, el tiempo para alcanzar el equilibrio debe ser más corto que si la tasa de acumulación es más lenta.

Plantaciones

Hay una mezcla de puntos de vista acerca del papel de las plantaciones en los sistemas agroforestales o silvoculturales. En cualquier caso, si se necesita tener un impacto a largo plazo en los sumideros, los productos deben convertirse en productos perecederos. Los productos para papel y el mayor uso de una gran cantidad de especies de crecimiento rápido, tienen cortos períodos de residencia, generalmente menos de un año, aunque la residencia puede ser mayor con campañas agresivas de reciclaje.

PROMOVER LA REGENERACIÓN DE LOS BOSQUES SECUNDARIOS EN TIERRAS DEGRADADAS

Promover y estimular la recuperación de tierras en degradación y degradadas, en bosques secundarios en regeneración y/o en sistemas sostenibles de uso de suelo, por medio de instrumentos legales y políticas fiscales. Promover y estimular la protección y preservación de bosques secundarios y sistemas de usos del suelos dominantes dentro de las diferentes zonas climáticas, documentar sus reservas de C existentes y cualquier incremento que ocurra. Promover el uso sostenible de productos no madereros.

Una vez que el C en la vegetación se pierde por quema y/o descomposición, la única manera de recuperarlo es mediante el crecimiento de similares cantidades de madera. Una vez que haya crecido, no puede cortarse nuevamente sin perderse C. La situación es peor que esto debido a que

los nutrientes en la madera que se volatilizan durante la quema o que se pierden en las cenizas deber ser absorbidos nuevamente por parte del suelo, los cuales están en bajas cantidades en los suelos infértiles de los bosques húmedos. Cualquier exportación de nutrientes de los bosques, especialmente de bajo valor pero de gran volumen - p. ej. madera - representa una pérdida similar y en las cantidades exportadas exceden la capacidad del suelo para reemplazar los nutrientes, o si exportadas - y usualmente lo hacen - la fertilidad del suelo disminuye y la producción caerá.

El secuestro de C en los bosques, ya sean regenerados – reforestación - o previamente deforestados – forestación - continuará a altas tasas hasta que los bosques lleguen a la madurez. El tiempo dependerá de la tasa aproximada de crecimiento de los árboles, porque las especies de crecimiento lento toman más tiempo para alcanzar la madurez que las especies de crecimiento rápido, y porque estas secuestran menos C en un determinado intervalo de tiempo, debido al lento crecimiento.

Un bosque maduro puede contener 132 t C/ha, en la parte aérea (Cerri *et al.* 1994). Si el bosque toma 50 años para llegar a la madurez, entonces la tasa promedio de acumulación es 2,64 t C ha⁻¹ año⁻¹. En el caso de que haya habido pérdidas del C del suelo por descomposición, cultivo, y quema entre otros procesos, la reforestación puede recuperar esta pérdida. Pero solamente en circunstancias raras sería posible que el sistema pueda adquirir más C atmosférico de lo que originalmente tenía el bosque antes de talarlo. Ellos incluyen sistemas de pastos introducidos productivos como bien manejados (Cerri *et al.* 1994) o posiblemente sistemas agrícolas en los cuales hay mucha incorporación de residuos de los cultivos en sistemas de labranza mínima. En el caso de la regeneración del bosque, si este C debe reconocerse como secuestrado permanentemente, entonces el manejo de los bosques debe de mantener las reservas de C tanto aéreo como subterráneo.

Los árboles de crecimiento rápido como *Eucalyptus* spp. y *Gmelina arborea*, no se deben usar para crear bosques de larga vida. La cantidad de C que ellos secuestran es efímera, el promedio de la cantidad de C en la biomasa en el momento de la cosecha dividido por la longitud del ciclo y luego descontada la longevidad del producto cosechado.

Claramente, los bosques secundarios son sumideros y se deben promover. Pero ¿cómo debe ser compensado un agricultor que crea bosques secundarios y como sobrevivirán? Se sabe que los bosques secundarios son frecuentemente talados y por lo tanto no pueden ser sumideros a largo plazo, aunque puede haber efectos a corto plazo. Los agricultores con una producción para su subsistencia y que son los que más usan el sistema de tala y quema, no adoptarán la práctica de plantar árboles, o si lo hacen no permitirán que los árboles lleguen o su madurez, sin hacer uso de ellos antes, sino existe alguna forma de compensación. La implementación de todos los instrumentos legales y políticas fiscales deberán tener estrategias para asegurar un flujo equitativo de beneficios a minorías: los pobres y desaventajados.

Será necesario intervenir con instrumentos legales y políticas fiscales sistemas no sostenibles de uso del suelo, como sistemas de ciclos cortos de tala y quema y sistemas de tierras pendientes y erosionables.

Debe ser posible estimular a los grandes ganaderos para reforestar sus propiedades con mecanismos apropiados. La compensación deberá ser al menos equivalente a la tasa neta de retorno del sistema de producción actual. En términos simples, si un pasto produce un promedio de 73 kg. ha⁻¹ año⁻¹ (200 g ha⁻¹ día⁻¹) con un valor aproximado de \$EE.UU. 1,50 kg⁻¹, el retorno bruto al ganadero es cerca de \$EE.UU. 110 ha⁻¹ yr⁻¹. Es posible que el costo del manejo de un bosque en

regeneración sea menor que el de la producción ganadera, pero solamente un análisis económico puede confirmarlo.

RESTABLECER LAS TIERRAS ABANDONADAS

Estas tierras en su mayoría son casi degradadas debido al uso de cortos ciclos de tala y quema. Deben hacerse las mismas consideraciones que para tierras degradadas, pero al no tener un propietario, el estado debe intervenir y tomar la responsabilidad de su reconstrucción. Al igual que con las tierras degradadas, debe haber la posibilidad de un enriquecimiento y uso sostenible para pagar el costo de la reconstrucción.

MEDIR Y DOCUMENTAR LAS RESERVAS DE C EN DIFERENTES SISTEMAS

Implementar sistemas para la medición, certificación y verificación del C secuestrado en los principales tipos de usos del suelo.

Existen tres pasos en este proceso:

- Medir el C actual en el sistema,
- Las mediciones deben ser certificadas
- Las mediciones deben ser verificadas.

La certificación y verificación de C actualmente secuestrado son esenciales para la comercialización. Si la propuesta es vender una cantidad determinada de C, el comprador tendrá todo el derecho y sin duda insistirá en mecanismos que garanticen la cantidad y calidad del producto, aunque no será fácil garantizar el tiempo para mantener esas condiciones. ¿Cincuenta años? ¿Quinientos años? Deben establecerse una serie de normas para que la venta de C se lleve a cabo.

Crear sistemas de medición

Uno de los aspectos que necesita ser aclarado es que las cantidades de C secuestrado deben ser estimadas con precisión, sin pensar si hay o no un mercado. Si existen datos precisos de las cantidades de C realmente secuestrado, el mercado puede ser creado para negociar sin pensar en el estado de los acuerdos internacionales. Si no hay datos, no hay ninguna posición negociadora.

Entonces, la necesidad de una estrategia es para establecer:

- ¿Cuáles son los sumideros y cuáles son sus estados?
- ¿Cuáles son las posibilidades para por lo menos mantenerlas o preferiblemente incrementarlas?, y
- ¿Cómo prevenir el aumento de las fuentes con la conversión de los bosques primarios y secundarios maduros para la agricultura?

La estrategia debe basarse principalmente en obtener datos sobre cuáles son los sumideros. En este momento, no es importante saber por qué ciertas comunidades actúan como sumideros, aunque más tarde deberá ser de interés el hacerlos más eficientes.

Certificación y verificación

La experiencia para medir la magnitud de los sumideros debe ser desarrollada dentro del país, aunque la certificación y la verificación requerirá que sea por parte de terceros. Muchas de las habilidades para medir la biomasa de los bosques son de los profesionales forestales entrenados, pero existe la necesidad para capacitar técnicos para realizar el trabajo de campo. Sin duda, los negocios orientados hacia la medición de las reservas de C en los sistemas de producción tendrán una gran demanda por sus servicios.

Algunas consideraciones

En la mayoría de los sistemas hay más C en el suelo que en la parte aérea de la vegetación, aún incluyendo las raíces. Cualquier forma de agricultura en los trópicos, como ocurre actualmente, tiene un impacto negativo en la MOS, dejando a un lado el impacto que pueda tener en las reservas de C aéreo. La labranza mínima o cero puede reducir la tasa de disminución o aún revestir las pérdidas anteriores de C, pero poco se sabe sobre los trópicos. Las ganancias en las regiones templadas son generalmente sin importancia, 0,5 a 1,0 t C ha⁻¹ año⁻¹, y en los primeros 10 hasta 20 cm. En los trópicos las ganancias pueden estar tan profundas como a 1 m.

Sin embargo, el Protocolo de Kyoto no considera ni el C del suelo ni el de las raíces. Esto resulta en una considerable subestimación de la cantidad de C secuestrado, debido a que el secuestro en el suelo puede ser mayor que en la parte aérea. Una de las críticas a los pastos en las áreas de bosques húmedos, es la pérdida de C cuando la parte aérea es talada. Sin embargo, Cerri *et al.* (1994) calcularon que la cantidad de C perdido por tala y quema de bosques tropicales, en Manaos, puede ser recuperado con un pasto *Brachiaria humidicola* en un período de 8 años.

Sitios seleccionados

Las descripciones de las áreas hechas por Cochrane *et al.* (1984), son una guía para seleccionar sitios para la medición del C acumulado. Aunque describen un total de 289 sistemas de tierras, cada uno consiste en un promedio de dos facetas, no es posible medir el C en cada uno, pero puede hacerse mejor que el método utilizado por Phillips *et al.* (1998), donde los 5 millones de km² de la Amazônia Legal del Brasil se representan por solo 11 sitios.

Un error común es creer que toda el área deforestada en Brasil es de bosque húmedo tropical. El término usado por Cochrane *et al.* (1984) se aplica a un tipo específico de bosque húmedo y no a toda la Amazonia. Los sitios propuestos por el LBA están sesgados hacia los bosques deciduos estacionales debido a que en el suroeste de Brasil está el bosque húmedo tropical propiamente dicho. Debe anotarse que en Brasil hay más bosques deciduos que bosques húmedos.

Es necesario extender el estudio de Cochrane *et al.* (1984) de los sistemas de tierras a Suriname y Guyana. Actualizar y hacer el estudio de Cochrane *et al.* (1984) más preciso. Dentro de cada faceta de tierra, tratar de obtener estimaciones de la variabilidad del suelo - la vegetación generalmente refleja la textura del suelo - y las imágenes de satélite ahora son mucho más precisas que las usadas por Cochrane *et al.* (1984) hace 15 años. Actualizar las estimaciones de Cochrane *et al.* (1984) sobre cultivos y pastos en cada faceta. Para los pastos se debe tratar obtener la edad o al menos su estado - degradado, vigoroso, o intermedio. Esto puede ser posible con las últimas imágenes de alta resolución y para relacionar la edad del pasto y su condición con la cantidad de C almacenado.

También se precisa seleccionar e inventariar parcelas permanentes de un tamaño adecuado al menos en las facetas más grandes de bosques no intervenidos y así determinar la magnitud de las

conclusiones de Phillips *et al.* (1998). De esta forma la mayor posición negociadora es el bosque primario y debe hacerse un gran esfuerzo para protegerlo.

Las estrategias deberán incluir una caracterización más intensa de los cambios con el uso del suelo, usando tanto imágenes de satélite como mediciones en el campo y se necesita investigación para la medición de la biomasa subterránea.

Intensidad del muestreo

¿Cuán intenso debe ser el muestreo? Obviamente tres sitios no son suficientes para hacer muestreo de 5 millones de km². ¿Pero, cómo se determina cuántos son suficientes?

Debe aceptarse que inicialmente habrá algunas dificultades dictadas por el gran tamaño del área y la falta de acceso a gran parte de la misma y la falta de recursos. Por lo tanto será necesario hacer un balance entre lo que es deseable y lo que es esencial. Por esta razón, las tareas serán cuidadosamente seleccionadas con un claro conocimiento de las posibilidades a largo plazo.

Claramente los detalles dados por Cochrane *et al.* (1984) permitirán la estratificación de las tierras en clases amplias. Un examen preliminar sugiere que una combinación de clases de climas y suelos es una buena posibilidad y posiblemente una o dos formas principales de tierras dentro de cada uno. En base a esto, puede ser posible seleccionar un rango de sitios de referencia. Otra forma será usar el criterio de selección propuesto por Jones para la selección de sitios que representen los tipos de áreas en los Cerrados de Brasil.

Siempre hay problemas al extrapolar de un área pequeña - como una parcela experimental, donde la información es muy precisa y por tanto con límites amplios de confianza - a un área de mayor escala. Si el campo es uniforme se puede extrapolar de parcelas experimentales a uno de sus lados. Sin embargo, a medida que aumenta el tamaño de la escala, las incertidumbres también lo hacen, como cuando se inicia la escala a nivel de una finca y luego se amplía a una microcuenca, a la cuenca, a la región, y finalmente al ecosistema, o aún, a todo el planeta. El problema es menos desalentador cuando los datos son aditivos, como los son para el C y la producción de plantas. Este aspecto se tiene en cuenta en el proyecto actual "Fase de Alternativas para la agricultura de tala y quema" y se discutió en la sección *Fase III (1999-2002) de ASB*.

En el caso del C - o producción - es suficiente saber cuál es el manejo de producción y la áreas a la que corresponden. El problema surge cuando la producción se determina por algún factor que no es aditivo, como el secuestro de C por parte de área en algún punto en particular en el futuro, cuando el uso del suelo y la cantidad de C secuestrado sea determinada por el comportamiento del usuario. Sin embargo, el problema es sólo en la predicción, no en la cual será la cantidad actual de C secuestrado cuando llegue el momento.

Como con cualquier problema de muestreo, las metodologías están bien establecidas, ya sea para una parcela experimental o para un área de mayor tamaño. En un área dada se determina el rango y la variabilidad por un muestreo al azar. El número de muestras que se debe tomar para llegar a un determinado nivel de precisión se calcula por la siguiente fórmulas.

Si el área es muy heterogénea, la variabilidad será muy alta y tomarse mas muestras para un determinado límite de confianza.

Análisis de las posibilidades del comercio de servicios ecológicos

El Mecanismo de Desarrollo Limpio no ha sido todavía adoptado o definido por las Conferencias de las Partes. Las Actividades de Implementación Conjuntas (AIJ) son todavía tema de debate y están en la fase piloto. Por esta razón, no se pueden hacer más que comentarios generales.

Conocimiento de las funciones

Hay por lo menos tres actividades de investigación internacional en la Amazonia Brasileña (LBA; PP-G7 y ASB, descritos en Capítulo 4). También hay un gran esfuerzo en investigación nacional en el este en Belém y en el oeste en Manaus y Acre. Estas actividades son apoyadas por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) con su propio satélite en órbita y uno adicional que será puesto muy pronto en operación. El Centro de Energía Nuclear da Agricultura junto con proyectos internacionales como el SHIFT también están involucrados.

A pesar de los esfuerzos, la cantidad de C en la vegetación del bosque no está bien documentada y nada se sabe acerca de las reservas de C en el suelo. Hay muchas limitaciones metodológicas que no permiten el progreso para entender los procesos que controlan las reservas de C y su dinámica. La primera estrategia es desarrollar bases de datos confiables sobre (i) el nivel básico de C en los suelos de la cuenca Amazónica, y (ii) el impacto del uso del suelo en las reservas de C para los principales grupos de suelos determinados por la Taxonomía de Suelos de los Estados Unidos.

Apoyar iniciativas como LBA y PP-G7 y extenderlas a los otros países con sitios satélites para verificar las conclusiones importantes. Deberá haber una colaboración y cooperación cercana entre los programas nacionales y universidades fomentadas al nivel de los países amazónicos y así asegurar que los países pequeños obtengan los beneficios de estos esfuerzos de investigación.

Una pregunta técnica importante, relacionada con la función, es ¿cuál es el potencial máximo de un sistema para secuestrar C y qué factores lo controlan? Por ejemplo, si los datos de Phillips *et al.* (1998) son correctos, ¿qué determinará los límites superiores de un bosque primario para secuestrar C? En el caso de pastos introducidos - discutidos en sección *Pastos introducidos y su manejo* - ¿por cuánto tiempo el suelo puede continuar acumulando C y qué lo controlará? ¿Pueden predecirse los máximos niveles de C en el suelo en determinadas condiciones climáticas?

CAPACITACIÓN

Capacitar personal en la metodología para medir los reservas de C en el campo y para análisis en el laboratorio. Habrá una gran demanda por técnicos y profesionales capaces de llevar a cabo inventarios y análisis de laboratorio que cubran la Amazonia. La demanda será mayor cuando el primer período de compromisos esté cerca y la demanda por créditos de C certificados aumente y así los países cumplan con sus compromisos bajo el Protocolo de Kyoto. Los países amazónicos deberán estimular a profesionales para que se capacitan como científicos de suelos, forestales, ecólogos y técnicos en análisis de laboratorio y de campo.

NEGOCIACIÓN

Negociar en la Conferencia de las Partes y con el Cuerpo Subsidiario apropiado la rápida implementación del Mecanismo de Desarrollo Limpio y otros, para promover transacciones internacionales bilaterales y el mercado libre de servicios ecológicos bajo las condiciones más

favorables para las Partes, basadas en datos reales, documentados y certificados de las cantidades de C secuestrado y las tasas del secuestro de C en la Cuenca Amazónica.

¿Quiénes deben ser los beneficiarios de cualquier esquema propuesto para recibir los servicios ecológicos? Fearnside (1997) cree que debe ser la población actual y sus descendientes. ¿Es ésta una división equitativa? Muchos de los pobladores de la Amazonia Brasileña son inmigrantes. ¿Deberían ser los aborígenes? O mejor ¿la población del país más grande? Obviamente la respuesta es una decisión política del país como un todo sin considerar que es lo que los observadores externos piensen.

¿Cuáles mecanismos pueden establecerse para el intercambio de los servicios ecológicos? Nuevamente, los individuos probablemente tienen un perfil para pedir bajo para rebaja, aunque el papel de cooperación no se puede olvidar. Si los gobiernos deben involucrarse, ¿a qué nivel? ¿federal o estatal?. No es posible juzgar cuál debe ser la mejor solución equitativa, pero es claro que cada país debe debatir sus problemas y llegar a una decisión, que inevitablemente, será política.

El punto crítico para la negociación es la definición de los Bosques de Kyoto anteriormente discutida (ver sección *El protocolo de Kyoto*). En el Protocolo de los Bosques de Kyoto específicamente se incluyen solamente sumideros que acumulan C sobre la superficie de la tierra en sistemas de forestación y reforestación y como fuentes las pérdidas por la deforestación. Todos los otros sumideros terrestres como el bosque primario y el suelo son excluidos. No hay posibilidades de forestación en la Cuenca Amazónica y por eso la reforestación en bosques secundarios presenta la única opción.

La acumulación del C atmosférico por bosques secundarios será un producto comercial bajo el Protocolo, solamente si el balance entre el C acumulado es mayor que el C emitido por la deforestación de los bosques y así permitiendo que todo el bosque funcione como un sumidero. Tomando en cuenta solamente el C sobre la tierra en los cálculos presentados en la Sección *Estimaciones iniciales del balance de carbono* cada hectárea de bosque primario talado pone en la atmósfera cerca 120 t C. La tasa máxima de acumulación de C sobre y bajo la superficie del suelo en los datos de Woomer (1999) fue de 120 t C en 20 años, pero el C en el suelo se presenta cerca 30% del C total (Figura 15). Por eso, el total de C acumulado en 20 años sobre y bajo la superficie del suelo es casi igual a la cantidad de C puesto en la atmósfera a partir de la biomasa aérea cuando el bosque primario es destruido. Sin embargo, la exclusión del C en el suelo en la tala y su inclusión en la regeneración queda una deficiencia por parte de la regeneración de aproximadamente 30%.

Esto significa que para cada hectárea del bosque talado, deben crecer cerca de 1.5 hectáreas de bosque secundario. En la actualidad el balance es fuertemente en la dirección opuesta. Para que la Cuenca Amazónica sea un sumidero neto, la tala de bosque debe detenerse, no es suficiente reducir solamente su tasa de destrucción. La regeneración del bosque secundario natural, inducida y/o reforzada debe ser promovida por todos los medios posibles. Para que la Cuenca Amazónica sea un sumidero neto dentro de las definiciones del Protocolo de Kyoto, la agricultura de subsistencia en sistemas de tala y quema no puede existir, ni la agricultura ni pastos de baja productividad. Para permitir la regeneración de los bosques secundarios en las tierras ya intervenidas, la única solución es la intensificación de la producción agrícola y pastoral en sistemas sostenibles.

Bibliografía

- Abrol, I.P. 1995. Gaseous emissions from agro-ecosystems in India. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 143-151.
- Anderson, D.W. 1995. Decomposition of organic matter and carbon emissions from soils. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 165-175.
- Angers, D.A. and Chenu, C. 1998. Dynamics of soil aggregation and C sequestration. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 199-206.
- Arnold, R.W. 1995. Role of soil survey in obtaining a global carbon budget. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 257-263.
- Aune, J.B. and Lal, R. 1995. The tropical soil productivity calculator - a model for assessing effects of soil management on productivity. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 499-520.
- Baar, R., Conceição, M.C.A., Denich, M. and Fölster, H. 1995. Diversity of secondary vegetation as a function of land-use and age. In: *Management and Rehabilitation of Degraded Lands and Secondary Forests in Amazonia*. (John A. Parrotta, J.A. and Kanashiro, M., eds.) International Institute of Tropical Forestry/USDA Forest Service, Río Piedras, Puerto Rico. Pp. 33-35
- Bajracharya, R.M., Lal, R. and Kimble, J. M. 1998. Soil organic carbon distribution in aggregates and primary particle fractions as influenced by erosion phases and landscape position. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 353-368.
- Bajracharya, R.M., Lal, R. and Kimble, J. M. 1998. Long-term tillage effects on soil organic carbon distribution in aggregates and primary particle fractions of two Ohio soils. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 113-124.
- Bastos, T.X., Pacheco, N.A., Rocha, A.M.A. da, Silva, B.N.R. da, Carvalho, JS. S., Sampaio, S.M.N. 1995. Effect of primary forest removal on rainfall regime in agricultural areas of the "Microrregião do Medio Amazonas"- Pará. In: *Management and Rehabilitation of Degraded Lands and Secondary Forests in Amazonia*. (John A. Parrotta, J.A. and Kanashiro, M., eds.) International Institute of Tropical Forestry/USDA Forest Service, Río Piedras, Puerto Rico. Pp.36-39.
- Bliss, N.B., Waltman, S.W. and Peterson, G.W. 1995. Preparing a soil carbon inventory for the United States using geographic information systems. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 275-295.
- Batjes, N.H. and Sombroek, W.G. 1997. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. *Global Change Biology* **3**:161-173.

- Bockheim, J.G., Wailer, D.A. and Everett, L.R. 1998. Soil carbon distribution in nonacidic and acidic tundra of arctic Alaska. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 143-156.
- Boddey, R.M. and Dobereiner, J. 1988. Nitrogen fixation associated with grasses and cereals; recent results and perspectives for future research. *Plant and Soil* **108**:53-65.
- Boddey, R.M. and Victoria, R.L. 1986. Estimation of biological nitrogen fixation associated with *Brachiaria* and *Paspalum* grasses using ¹⁵N labelled organic matter and fertilizer. *Plant and Soil* **90**:265-292.
- Bogner, J. and Spokas, K. 1995. Carbon storage in landfills. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 67-80.
- Bouzaher, A., Holtkamp, D.J., Shogren, J. and Reese, R. 1995. Economic and resource impacts of policies to increase organic carbon in agricultural soils. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 309-328.
- Bronson, K.F., Cassman, K.G., Wassmann, R., Olk, D.C., van Noordwijk, M. and Garrity, D.P. 1988. Soil carbon dynamics in different cropping systems in principal ecoregions of Asia. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 35-58.
- Brown, S. and Lugo, A.E. 1982. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica* **14**: 161-167.
- Brown, S., Anderson, J.M., Woomer, P.L., Swift, M.J. and Barrios E. 1994. Soil biological processes in tropical ecosystems. In: *The Biological Management of Tropical Soil Fertility* (P.L. Woomer and M.J. Swift, eds.). John Wiley and Sons, Chichester, UK. Pp. 15-46.
- Bulla, L., Pacheco, J. and Miranda, R. 1981. A simple model for the measurement of primary production in grasslands. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Ciencias Naturales* **36**:281-304.
- Buyanovsky, G.A. and Wagner, G.H. 1995. Soil respiration and carbon dynamics in parallel native and cultivated ecosystems. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 209-217.
- Cambardella, C.A. 1998. Experimental verification of simulated soil organic matter pools. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 519-526.
- Cambardella, C.A. and Elliott, E.T. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal* **56**:777-783.
- Cassman, K.G., De Datta, S.K., Olk, D.C., Alcantara, J., Samson, M., Descalsota, J. and Dizon, M. 1995. Yield decline and the nitrogen economy of long-term experiments on continuous, irrigated rice systems in the tropics. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 181-222.
- Cerri, C., Volkoff, B. and Andreaux, F. 1991. Nature and behaviour of organic matter in soils under natural forest, and after deforestation, burning and cultivation, near Manaus. *Forest Ecology and Management* **38**:247-257.
- Cerri, C., Bernoux, F. and Blair, G.J. 1994. Carbon pools and fluxes in Brazilian natural and agricultural systems and the implications for the global CO₂ balance. *Transactions 15th World Congress of Soil Science* 5a:399-406, Acapulco.

- Cerri, C.C., Bernoux, M., Arrouays, D., Feigl, B.J. and Piccolo, M.C. 1999. Carbon stocks in soils of the Brazilian Amazon. In: *Carbon Pools and Dynamics in Tropical Ecosystems* (R. Lal, B.A. Stewart and J.M. Kimble, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida (in press).
- Chen, Z., Pawluk, S. and Juma, N.G. 1998. Impact of variations in granular structures on C sequestration in two Alberta mollisols. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 225-244.
- Cheng, H. H. and Molina, J.A. E. 1995. In search of bioreactive soil organic carbon: the fractionation approaches. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 343-350.
- Cheng, H.H. and Kimble, J. 1999. Methods of analysis for soil carbon: An overview. In: *Carbon Pools and Dynamics in Tropical Ecosystems* (R. Lal, B.A. Stewart and J.M. Kimble, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida (in press).
- Cihacek, L. J. and Ulmer, M. G. 1995. Estimated soil organic carbon losses from long-term crop-fallow in the northern Great Plains of the USA. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 85-92.
- Cihacek, L.J. and Ulmer, M.G. 1998. Effects of tillage on profile soil carbon distribution in the northern Great Plains of the U.S. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 83-92.
- Cline, R.G. and Ruark, G.A. 1995. Management of forest soils. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 365-371.
- Cochrane, T.T., Sánchez, L.G., Azevedo, L.G. de, Porras, J.A. and Garver, C.L. 1985. Land in Tropical America. In three volumes, Volume 2 in three parts. Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT and Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Centro de Pesquisa Agropecuárias Cerrados EMBRAPA-CPAC. 144, (Maps, 63,47) and 147 pp.
- Cochran, V.L., Schlentner, S.F. and Mosier, A.R. 1995. CH₄ and H₂O flux in subarctic agricultural soils. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 179-186.
- Commission for Environmental Cooperation 1997. Analysis of the Potential for a Greenhouse Gas Trading System for North America. Phase 1: Institutional Analysis and Design Considerations. CEC, Montreal, Canada. 92 pp + 32 pp of appendices.
- Crawford, M.C., Grace, P.R. and Oades, J.M. 1998. Effect of defoliation of medic pastures on below-ground carbon allocation and root production. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 381-390.
- Crozier, C.R., DeLaune, R.D. and Patrick, W.H. 1995. Methane production in Mississippi deltaic plain wetland soils as a function of soil redox species. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 247-255.
- Decaens, T., Lavelle, P., Jean Jiménez, J.J., Escobar, G. and Rippstein, G. 1994. Impact of land management on soil macrofauna in the Oriental Llanos of Colombia. *European Journal of Soil Biology* **30**:157-168.
- Denich, M. and Kanashiro, M. 1995. Secondary vegetation in the agricultural landscape of northeast Pará, Brazil. In: *Management and Rehabilitation of Degraded Lands and Secondary Forests in Amazonia*. (John A. Parrotta, J.A. and Kanashiro, M., eds.) International Institute of Tropical Forestry/USDA Forest Service, Río Piedras, Puerto Rico. Pp. 12-21.
- Denich, M., Kanashiro, M. and Vlek, P.L.G. 1999. The potential and dynamics of carbon sequestration in traditional and modified fallow systems in the Eastern Amazon region, Brazil. In: *Carbon Pools and*

- Dynamics in Tropical Ecosystems* (R. Lal, B.A. Stewart and J.M. Kimble, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida (in press).
- Dick, W.A. and Durkalski, J. T. 1988. No-tillage production agriculture and carbon sequestration in a typical fragiudalf soil of northeastern Ohio. Soil carbon dynamics in different cropping systems in principal ecoregions of Asia. Soil carbon dynamics in different cropping systems in principal ecoregions of Asia. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 59-72.
- Diekmann, D., Denich, D. and Vlek, P.L.G. 1995. Characterization of soil microbiological processes in different phases of the cultivation system (slash and burn) in the Bragantina zone of the state of Pará, Brazil. In: *Management and Rehabilitation of Degraded Lands and Secondary Forests in Amazonia*. (John A. Parrotta, J.A. and Kanashiro, M., eds.) International Institute of Tropical Forestry/USDA Forest Service, Rfo Piedras, Puerto Rico. Pp.40-43.
- Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C. and Wisniewski, J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* **263**:185-190.
- Donigian, A.S., Patwardhan, A.S., Jackson, R.B., Barnwell, T. O., Weinrich, K.B. and Rowell, A.L. 1995. Modeling the impacts of agricultural management practices on soil carbon in the central U.S. In: *Soil Management and Greehouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 121-135.
- Donigian, A.S., Patwardhan, A.S., Chinnaswamy, R.V. and Barnwell, T.O. 1998. Modeling soil carbon and agricultural practices in the central U.S.: An update of preliminary study results. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 499-518.
- Doran, J.W., Sarrantonio, M. and Liebig, M.A.1996. Soil health and sustainability. *Advances in Agronomy* **56**:2-54.
- Duxbury, J.M. and Mosier, A.R. 199?. Status and issues concerning agricultural emissions of greenhouse gases. In:
- Duxbury, J.M. 1995. The significance of greenhouse gas from soils of tropical agroecosystems. In: *Soil Management and Greehouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 279-291.
- Eisner, W.R. 1998. Arctic paleoecology and soil processes: developing new perspectives for understanding global change. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 127-142.
- Eswaran, H., Van den Berg, E., Reich, P. and Kimble, J. 1995. Global soil carbon resources. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 27-43.
- Falesi, I.C. 1976. Ecosistema de pastagem cultivada na Amazônia Brasileira. Boletim Técnico CPATU, Belém, No 1. Pp. 1-75
- Fearnside, P.M. 1997. A Roraima e o aquecimento global: balanço anual das emissões de gases do efeito estufa provenientes da mudança de uso da terra. In: Rl. Barbosa; E. Ferreira and E. B. Castellon (eds.) *Ocupação Humana Ambiente e Ecologia em Roraima*, Manaus. Pp. 337-359.
- Fearnside, P.M. 1997. Limitng factors for development of agriculture and ranching in Brazilian Amazonia. *Revista Brasileira de Biologia* 57(4):531-549.
- Fearnside, P.M. 1997. Greenhouse-gas emmissions from Amazonian hydroelectric reservoirs: The example of Brazil's Tucuruí Dam as compared to fossil fuel ahernatives. *Environmental Conservation* 24(1): 64-75.
- Fearnside, P.M. and Barbosa, R.I. 1998. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*. **108**:147-166.

- Feigl, B.J., Melillo, J. and Cerri, C.C. 1995. Changes in the origin and quality of soil organic matter after pasture introduction in Rondônia (Brazil). *Plant and Soil* **175**:21-29.
- Fisher, M.J., Rao, I.M., Ayarza, M.A., Lascano, C.E., Sanz, J.I., Thomas, R.J. and Vera, R.R. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature (London)* **371**:236-238.
- Fisher, M.J., Rao, I.M., Lascano, C.E., sanz, J.I., Thomas, R.J., Vera, R.R. and Ayarza, M.A. 1995. Pasture soils as carbon sink. *Nature* **376**: 473.
- Fisher, M.J., Rao, I.M. and Thomas, R.J. 1998. Nutrient cycling in tropical pastures, with special reference to the neotropical savannas. *Proceedings of the XVII International Grasslands Congress, Winnipeg and Saskatchewan, Canada*. (In press).
- Fisher, M.J., Thomas, R.J. and Rao, I.M. 1998. Management of tropical pastures in acid-soil savannas of South America for carbon sequestration in the soil. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 405-420.
- Follett, R.F. 1998. CRP and microbial biomass dynamics in temperate climates. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 305-322.
- Fujisaka, S., Castilla, C., Escobar, G., Rodrigues, V., Veneklaas, E.J., Thomas, R. and Fisher, M. 1998. The effects of forest conversion on annual crops and pastures: Estimates of carbon emissions and plant species loss in a Brazilian Amazon colony. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. **3**:17-26.
- Gennadiyev, A. 1998. Rate of humus (organic carbon) accumulation in soils of different ecosystems. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 103-108.
- Gifford, R.M. 1994. The global carbon cycle: A view point on the missing sink. *Australian Journal of Plant Physiology* **21**:1-15.
- Gifford, R.M., Thorne, J.H., Hitz, W.D. and Giaquinta, R.T. 1984. Crop productivity and photoassimilate partitioning. *Science* **225**:801-808.
- Gijsman, A.J., Oberson, A., Tiessen, H. and Friesen, D.K. 1996. Limited applicability of the CENTURY model to highly weathered tropical soils. *Agronomy Journal* **88**: (in press).
- Giraldo, L.M., Lizcano, L.J., Gijsman, A.J., Rivera, B. y Franco, L.H. 1998. Adaptación del modelo DSSAT para simular la producción de I. *Pasturas Tropicales* 20(2):2-12.
- Glendining, M.J. and Powlson, D. S. 1995. The effects of long continued applications of inorganic nitrogen fertilizer on soil organic matter - a review. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 385-446.
- Golchin, J.A., Baldock, J.A. and Oades, J.M. 1998. A model linking organic matter decomposition, chemistry, and aggregate dynamics. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 245-266.
- Gommes, R. and Fresco, L.O. 1998. Everybody complains about the climate... What can agricultural science and the CGIAR do about it? Consultative Group on International Agricultural Research - CGIAR Document No. MTM/98/9. 29pp.
- Grace, P.R., Post, W.M., Godwin, D.C., Bryceson, K.P., Truscott, M.A. and Hennessy, K.J. 1998. Soil Carbon Dynamics in Relation to Soil Surface Management and Cropping Systems in Australian Agroecosystems. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 175-194.

- Grant, R.F., Izaurralde, R.C., Nyborg, M., Malhi, S.S., Solberg, E.D. and Jans-Hammermeister, D. 1998. Modeling tillage and surface residue effects on C storage under ambient vs. elevated CO₂ and temperature in *Ecosys*. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 527-548.
- Greenland, D.J. 1995. Land use and soil carbon in different agroecological zones. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 9-24.
- Greenland, D.J. 1998. Carbon sequestration in soil: knowledge gaps indicated by the Symposium presentations. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 591-594.
- Groffman, P.M., Pouyat, R.V., McDonnell, M.J., Pickett, S.T.A. and Zipperer, W.C. 1995. Carbon pools and trace gas fluxes in urban forests. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 147-158.
- Grossman, R.B., Ahrens, R.J., Gile, L.H., Montoya, C.E. and Chadwick, O.A. 1995. Areal evaluation of organic and carbonate carbon in a desert area of southern New Mexico. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 81-91.
- Grossman, R.B., Harms, D.H., Kuzila, M.S., Glaum, S.A., Hartung, S.L. and Fortner, J.R. 1998. Organic carbon in deep alluvium in southeast Nebraska and northeast Kansas. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 45-56.
- Hansmeyer, T.L., Linden, D.R., Allan, D.L. and Huggins, D.R. 1998. Determining carbon dynamics under no-till, ridge-till, chisel, and moldboard tillage systems within a corn and soybean cropping sequence. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 93-98.
- Haque, I., Powell, J.M. and Ehui, S.K. 1995. improved crop-livestock production strategies for sustainable soil management in tropical Africa. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 293-345.
- Harris, H.C. 1995. Long-term trials on soil and crop management at ICARDA. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 447-469.
- Harrison, K.G. 1998. Using bulk radiocarbon measurements to estimate soil organic matter turnover times. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 549-560.
- Herrick, J.E. and Wander, M.M. 1998. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: The importance of distribution, composition, and soil biological activity. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 405-426.
- Himes, F.L. 1998. Nitrogen, sulfur, and phosphorus and the sequestering of carbon. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 315-320.
- Hölscher, D. 1997. Shifting cultivation in Eastern Amazonia: a case study on the water and nutrient balance. *Plant Research and Development* Volume 46. (Bittner, A. et al. eds.) Institute for Scientific Co-operation. Tübingen. Federal Republic of Germany. Pp. 68-87.
- Hölscher, D., Ludwig, B., Möller, R.F. and H. Fölster 1997. Dynamic of soil chemical parameters in shifting agriculture in the Eastern Amazon. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **66**:153-163.

- Hölscher, D., Möller, R.F., Denich, M. and Fölster, H. 1997. Nutrient input-output budget of shifting agriculture in Eastern Amazonia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **47**:49-37.
- Hölscher, D., Sá, T.D. de A., Bastos, T.X. Denich, M. and Fölster, H. 1997. Evaporation from young secondary vegetation in eastern Amazonia. *Journal of Hydrology* **193**:293-305.
- Hölscher, D., Sá, T.D. de A., Möller, R.F., Denich, M. and Fölster, H. 1998. Rainfall partitioning and related hydrochemical fluxes in a diverse and in a mono specific (*Phenakospermum guyannense*) secondary vegetation stand in eastern Amazonia. *Oecologia* **114**:251-257.
- Hoosbeek, M.R. and Bryant, R.B. 1995. Modeling the dynamics of organic carbon in a Typic Haplorthod. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 415-431.
- Houghton, J.T., Jenkins, G.J. and Ephraums, J.J. 1990. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Houghton, R.A. 1995. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 45-65.
- Huggins, D.R., Allmaras, R.R., Clapp, C.E. and Lamb, J.A. 1995. Carbon sequestration in corn-soybean agroecosystems. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 61-68.
- Huggins, D.R., Allan, D.L., Gardner, J.C., Karlen, D.L., Bezdicek, D.F., Rosek, M.J., Alms, M.J., Flock, M., Miller, B.S. and Staben, M.L. 1998. Enhancing carbon sequestration in CRP-managed land. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 323-334.
- Hutchinson, G.L. 1995. Biosphere - atmosphere exchange of gaseous n oxides. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 219-236.
- IGBP Terrestrial Working Group (Steffen, W. et al.) 1998. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol. *Science* **280**:1393-1394.
- Ingram, J.S. and Fernandes, E.C.M. 1999. Managing carbon sequestration in soils: a note on concepts and terminology. In: *Carbon Pools and Dynamics in Tropical Ecosystems* (R. Lal, B.A. Stewart and J.M. Kimble, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida (in press).
- Intergovernmental Panel on Climate Change 1996. *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations, and Mitigation. Summary for Policymakers*. World Meteorological Organization and United Nations Environment Programme. 22 pp.
- Izaurrealde, R.C., McGill, W.B., Bryden, A., Graham, S., Ward, M. and Dickey, P. 1998. Scientific challenges in developing a plan to predict and verify carbon storage in Canadian prairie soils. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 433-446.
- Izaurrealde, R.C., Nyborg, M., Solberg, E.D., Janzen, H.H., Arshad, M.A., Malhi, S. S. and Molina-Ayala, M. 1998. Carbon storage in eroded soils after five years of reclamation techniques. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 369-386.
- Jackson, R.B., Rowell, A.L. and Weinrich, K.B. 1995. Spatial modeling using partially spatial data. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 105-115.
- Jackson, R.B., Candell, J., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala O.E. and Schulze E-D. 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* **108**:389-411.

- Jans-Hammermeister, D.C., McGill, W.B. and Izaurralde, R.C. 1998. Management of soil C by manipulation of microbial metabolism: Daily vs. pulsed C additions. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 321-334.
- Janzen, H.H., Campbell, C.A., Gregorich, E.G. and Ellert, B.H. 1998. Soil carbon dynamics in Canadian agroecosystems. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 57-80.
- Jastrow, J.D. and Miller, R.M. 1998. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organo-mineral associations. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 207-224.
- Johnson, D.W. and Henderson, P. 1995. Effects of forest management and elevated carbon dioxide on soil carbon storage. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 137-145.
- Johnson, D.W. and Todd, D.E. 1998. Effects of harvesting intensity on forest productivity and soil carbon storage in a mixed oak forest. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 351-364.
- Johnson, M.G. 1995. The role of soil management in sequestering soil carbon. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 351-363.
- Jones, M.B., Long, S.P. and Roberts, M.J. 1989. Synthesis and conclusions. In: *Primary Productivity of Grass Ecosystems of the Tropics and Sub-tropics* (S.P. Long, M.B. Jones and M.J. Roberts, eds.). Chapman and Hall, London. Pp.212-255.
- Juma, N.G. 1995. Dynamics of soil C and N in a Typic Cryoboroll and a Typic Cryoboralf located in the cryoboreal regions of Alberta. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 187-196.
- Kay, B.D. 1998. Soil structure and organic carbon: a review. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 169-198.
- Kemper, W.D., Alberts, E.E., Foy, C.D., Clark, R.B., Ritchie, J.C. and Zobel, R.W. 1998. Aerenchyma, acid tolerance, and associative n fixation enhance carbon sequestration in soil. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 221-234.
- Kern, J.S., Bachelet, D. and Tolg, M. 1995. Organic matter inputs and methane emissions from soils in major rice growing regions of China. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 189-198.
- Kern, J.S., Turner, D.P. and Dodson, R.F. 1998. Spatial patterns in soil organic carbon pool size in the northwestern United States. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 29-44.
- Klein Goldewijk, C.G.M. and Vloedbed, M. 1995. The exchange of carbon dioxide between the atmosphere and the terrestrial biosphere in Latin America. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 395-413.
- Kolchugina, T.P. Vinson, T.S., Gaston, G.G., Rozhkov, V.A. and. Schlentner, S.F. 1995. Carbon pools, fluxes, and sequestration potential in soils of the former Soviet Union. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 25-40.

- Konyushkov, D.Ye. 1998. Geochemical history of carbon on the planet: Implications for soil carbon studies. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 293-314.
- Körschens, M. 1998. Effect of different management systems on carbon and nitrogen dynamics of various soils. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 297-304.
- Kuylenstierna, J., Hicks, K. and Herrera, R., eds. 1998. Contaminación Atmosférica Regional en los Países en Desarrollo. Documentos de Apoyo para los Dialogos de Acción Política, América Latina, 1998. Stockholm Environment Institute, Stockholm. 134 pp.
- Lacelle, B. 1998. Canada's soil organic carbon database. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 93-102.
- Laidlaw, J.W., Nyborg, M. and Izaurralde, R.C. 1995. Nitrous oxide flux from thawing soils in Alberta. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 237-245.
- Lal, R. 1995. Global soil erosion by water and carbon dynamics. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 131-142.
- Lal, R. 1995. Technological options for sustainable management of Alfisols and Ultisols in Nigeria.. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 123-139.
- Lal, R. 1995. Trends in world agricultural land use: potential and constraints. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 521-536.
- Lal, R. and Logan, T.J. 1995. Agricultural activities and greenhouse gas emissions from soils of the tropics. In: *Soil Management and Greehouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 293-307.
- Lal, R., Fausey, N.R. and Eckert, D.J. 1995. Land use and soil management effects of emissions of radiatively active gases from two soils in Ohio. In: *Soil Management and Greehouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 41-59.
- Lal, R., Kimble, J., Levine, E. and Whitman, C. 1995. World soils and greenhouse effect: an overview. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 1-7.
- Lal, R., Kimble, J., Levine, E. and Whitman, C. 1995. Towards improving the global data base on soil carbon. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 433-436.
- Lal, R., Kimble, J., and Stewart, B.A. 1995. World soils as a source or sink for radiatively-active gases. In: *Soil Management and Greehouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 1-7.
- Lal, R., Kimble, J. and Stewart, B.A. 1995. Towards soil management for mitigating the greenhouse effect. In: *Soil Management and Greehouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 373-381.
- Lal, R. and Stewart, B.A. 1995. Managing soils for enhancing and sustaining agricultural production. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 1-9.

- Lal, R. and Stewart, B.A. 1995. Need for long-term experiments in sustainable use of soil resources. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 537-545.
- Lal, R. 1998. Land use and soil management effects on soil organic carbon dynamics on alfisols in western Nigeria. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 109-126.
- Lal, R., Kimble, J. and Follett, R. 1998. Need for research and need for action. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 447-454.
- Lal, R., Kimble, J. and Follett, R. 1998. Pedospheric processes and the carbon cycle. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 1-8.
- Lal, R., Kimble, J. and Follett, R. 1998. Land use and soil C pools in terrestrial ecosystems. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 1-10.
- Lal, R., Kimble, J. and Follett, R. 1998. Knowledge gaps and researchable priorities. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 595-604.
- Laryea, K.B., Anders, M.M. and Pathak, P. 1995. Long-term experiments on Alfisols and Vertisols in the semiarid tropics. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 267-292.
- Lavelle, P., Dangerfield, M., Fragoso, C., Eschenbrenner, V., Lopez-Hernandez, D., Pashanasi, B. and Brussaard, L. 1994. The relationship between soil macrofauna and tropical soil fertility. In: *The Biological Management of Tropical Soil Fertility* (P.L. Wooster and M.J. Swift, eds.). John Wiley and Sons, Chichester, UK. Pp. 137-170.
- Lavelle, P., Gilot, C., Fragoso, C. and Pashanasi, B. 1994. Soil fauna and sustainable land use in the humid tropics. In: *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. (D.J. Greenland and I. Szabolcs, eds.) CAB International, Wallingford. pp. 291-308.
- Levine, E.R. and Kimes, D. 1998. Predicting soil carbon in mollisols using neural networks. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 473-484.
- Li, C. 1995. Modeling impact of agricultural practices on soil C and N₂O emissions. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 101-112.
- Linden, D.R. and Clapp, C.E. 1998. Effect of corn and soybean residues on earthworm cast carbon content and natural abundance isotope signature. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 345-352.
- Lioubimtseva, E. 1998. Impacts of climatic change on carbon storage variations in African and Asian deserts. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 561-576.
- Long, S.P., García Moya, E., Imbamba, S.K., Kamnalrut, A., Piedade, M.T.F., Scurlock, J.M.O., Shen, Y. K. and Hall, D.O. 1989. Primary productivity of natural grass ecosystems of the tropics: a reappraisal. *Plant and Soil* **115**:155-166.
- Long, S.P., Jones, M.B. and Roberts, M.J., eds. 1992. Primary Productivity of Grass Ecosystems of the Tropics and Sub-Tropics. Chapman and Hall, New York. 255 pp.

- Ludwig, B., Hölscher, D., Khanna, P., Prenzel, J. and Fölster, H. 1997. Modelling of sorption experiments and seepage data of an Amazonian Ultisol subsoil under cropping fallow. *Z. Pflanzenernähr Bodenk.* **160**:447 – 454.
- Lugo, A.E. and Brown, S. 1993. Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon. *Plant and Soil* **149**:27-41.
- Lugo, A.E. and Sánchez, M.J. 1986. Land use and organic carbon content of some subtropical soils. *Plant and Soil* **96**:185-196.
- Mackensen, J., Hölscher, D., Klinge, R. and Fölster, H. 1996. Nutrient transfer to the atmosphere by burning of debris in eastern Amazonia. *Forest Ecology and Management* **86**:121-128.
- Malcolm, R.L., Kennedy, K., Ping, C.L. and Michaelson, G.T. 1995. Fractionation, characterization, and comparison of bulk soil organic substances and water-soluble soil interstitial organic constituents in selected cryosols of Alaska. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 315-327.
- Mattson, K.G. 1995. CO₂ efflux from coniferous forest soils: comparison of measurement methods and effects of added nitrogen. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 329-341.
- McCarl, B. and Callaway, J.M. 1995. Carbon sequestration through tree planting on agricultural lands. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 329-338.
- McQuaid, B.F. and Olson, G.L. 1998. Soil quality indices of piedmont sites under different management systems. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 427-434.
- Merry, C.J. and Levine, E.R. 1995. Methods to assess soil carbon using remote sensing techniques. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 265-274.
- Metherell, A.K., Cambardrella, C.A., Parton, W.J., Petersen, G.A., Harding, L.A. and Cole, C.V. 1995. Simulation of soil organic matter dynamics in dryland wheat-fallow cropping systems. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 259-270.
- Miles, J.W. and Lapointe, S.L. 1992. Regional germplasm evaluation: a portfolio of germplasm options for the major ecosystems of tropical America. Pages 9-28 in *Pastures for the Tropical Lowlands: CIAT's Contribution*. CIAT, Cali.
- Milner, C. and Hughes, R.E. 1992. *Primary production of grassland*. *IBP handbook 6*. Blackwell, Oxford.
- Miranda, C.H.B., Urquiaga, S. and Boddey, R.M. 1990 Selection of ecotypes of *Panicum maximum* for associated biological nitrogen fixation using the ¹⁵N isotope dilution technique. *Soil Biology and Biochemistry* **22**:657-663.
- Mitchell, P.D., Lakshminarayan, P.G., Otake, T. and Babcock, B.A. 1998. The impact of soil conservation policies on carbon sequestration in agricultural soils of the central United States. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 125-142.
- Mitsch, W.J. and Wu, X. 1995. Wetlands and Global Change. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 205-230.
- Monreal, C.M., Diné, H., Schnitzer, M., Gamble, D.S. and Biederbeck, V.O. 1998. Impact of carbon sequestration on functional indicators of soil quality as influenced by management in sustainable

- agriculture. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 435-458.
- Moore, T.R. and Roulet, N.T. 1995. Methane emission from Canadian peatlands. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 153-164.
- Moore, T.R. 1998. Dissolved organic carbon: Sources, sinks, and fluxes and role in the soil carbon cycle. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 281-292.
- Moraes, J.L., Cerri, C.C., Melillo, J.M., Kicklighter, D., Neill, C., Skole, D.L. and Steudler, P.A. 1995. Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon basin. *Soil Science Society of America Journal* **59**:244-247.
- Moraes, J.F.L. de, Volkoff, B., Cerri, C.C. and Bernoux, M. 1996. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma* **70**: 68-81
- Mulongoy, K.J., Smith, J., Alirol, P. and Witthoef-Muehlmann, A. 1998. Are Joint Implementaion and the Clean Development Mechanism opportunities for forest sustainable management ththrough carbon sequestration projects?
- Myers, R.J.K., Palm, C.A., Cuevas, E., Gunatilleke, I.U.N. and Brossara, M. 1994. The synchronisation of nutrient mineralisation and plant nutrient demand. In: *The Biological Management of Tropical Soil Fertility* (P.L. Woomer and M.J. Swift, eds.). John Wiley and Sons, Chichester, UK. Pp. 81-116.
- Neill, C., Piccolo, M.C., Steudler, P.A., Melillo, J.M., Feigl, B.J. and Cerri, C.C. 1995. Nitrogen dynamics in soils of forests and active pastures in the western Brazilian Amazon basin. *Soil Biology and Biochemistry* **27**:1167-1175.
- Neill, C., Piccolo, M.C., Cerri, C.C., Steudler, P.A., Melillo, J.M. and Brito, M. 1997. Net nitrogen mineralization and net nitrification rates in soils following deforestation for pasture across the southwestern Brazilian Amazon Basin landscape. *Oecologia* **110**:243 – 252.
- Neill, C. Cerri, C., Melillo, J.M., Feigl, B.J., Steudler, P.A., Moraes, J.F.L. and Piccolo, M.C. 1998. Stocks and dynamics of soil carbon following deforestation for pasture in Rondonia. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 9-28.
- Németh, T., Csathó, P. and Anton, A. 1998. Soil carbon dynamics in relation to cropping systems in principal ecoregions of eastern Europe, with particular regard to Hungarian experiences. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 255-284.
- Nepstad, D.C., de Carvalho, C.R., Davidson, E.A., Jipp, P.H., Leffebvre, P.A., Negreiros, G. A., da Silva, E.D., Stone, T.A., Trumbore, S.E. and Vieira, S. 1994. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature (Lond.)* **372**:666-669.
- Nyborg, M., Solberg, E.D., Malhi, S.S. and Izaurrealde, R.C. 1995. Fertilizer N, crop residue, and tillage alter soil C and N content in a decade. In: *Soil Management and Greehouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 93-99.
- Nyborg, M., Molina-Ayala, M., Solberg, E.D., Izaurrealde, R.C., Malhi, S.S. and Janzen, H.H. 1998. Carbon storage in grassland soils as related to N and S fertilizers. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 421-432.
- Oades, J.M. 1988. The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry* **5**:35-70.
- Oechel, W.C. and Vourlitis, G.L. 1995. Effect of global change on carbon storage in cold soils. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 117-129.

- Ofori, C.S. 1995. Need for long-term soil management research in Africa. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 485-497.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V. and Ojima, D.S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal* **51**:1173-1179.
- Parton, W.J., Stewart, J.W.B. and Cole, C.V. 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry*. **5**:109-131.
- Parton W.J., Scurlock, J.M.O., Ojima, D.S., Schimel, D.S., Hall, D.O. and SCOPEGRAM GROUP Members. 1995. Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide. *Global Change Biology*. **1**:13-22.
- Parton, W.J., Wooster, P.L. and Martin, A. 1994. Modelling soil organic matter dynamics and plant productivity in tropical ecosystems. In: *The Biological Management of Tropical Soil Fertility* (P.L. Wooster and M.J. Swift, eds.). John Wiley and Sons, Chichester, UK. Pp. 171-188.
- Patwardhan, A.S., Chinnaswamy, R.V., Donigian, A.S., Metherell, A.K., Blevins, R.L., Frye, W.W. and Paustian, K. 1995. Application of the CENTURY soil organic matter model to a field site in Lexington, KY. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 385-394.
- Patwardhan, A.S., Donigian, A.S., Chinnaswamy, R.V. and Barnwell, T.O. 1998. A retrospective modeling assessment of historical changes in soil carbon and impacts of agricultural development in central U.S.A., 1900 to 1990. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 485-498.
- Paul, E.A., Horwath, W.R., Harris, D., Follett, R., Leavitt, S.W., Kimball, B.A. and Pregitzer, K. 1995. Establishing the pool sizes and fluxes in CO₂ emissions from soil organic matter turnover. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 297-305.
- Paustian, K., Robertson, G.P. and Elliott, E.T. 1995. Management impacts on carbon storage and gas fluxes (CO₂, CH₄) in mid-latitude cropland ecosystems. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 69-83.
- Paustian, K., Elliott, E.T. and Killian, K. 1998. Modeling soil carbon in relation to management and climate change in some agroecosystems in the central North America. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 459-472.
- Piccolo, M.C., Neill, C. and Cerri, C.C. 1994. Natural abundance of ¹⁵N in soils along forest-to-pasture chronosequences in the western Brazilian Amazon basin. *Oecologia* **99**: 112-117.
- Pieri, C. 1995. Long-term soil management experiments in semiarid francophone Africa (1995). In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 225-266.
- Ping, C.L., Michaelson, C. J. and Malcolm, R.L. 1995. Fractionation and carbon balance of soil organic matter in selected cryic soils in Alaska. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 307-314.
- Ping, C.L., Michaelson, G.J., Loya, W.M., Chandler, R.J. and Malcolm, R.L. 1998. Characteristics of soil organic matter in arctic ecosystems of Alaska. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 157 -168.

- Phillips, O.L., Malhi, Y., Higuchi, N., Laurance, W.F., Núñez, P.V., Vázquez, R.M., Laurance, S.G., Ferreira, L.V., Stern, M., Brown, S. and Grace, J. 1998. Changes in the Carbon Balance of Tropical Forests: Evidence from Long-Term Plots. *Science* **282**:439-442.
- Prueger, J.H., Parkin, T.B. and Hatfield, J.L. 1995. A micrometeorological technique for methane flux determination from a field treated with swine manure. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 377-384.
- Pushparajah, E. and Eswaran, H. 1995. An integrated approach to soil management experiments. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 473-484.
- Rabenhorst, M.C. 1995. Carbon storage in tidal marsh soils. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 93-103.
- Ramakrishnan, P.S. 1994. The Jhum agroecosystem in north-eastern India: A case study of the biological management of soils in a shifting agricultural system. In: *The Biological Management of Tropical Soil Fertility* (P.L. Woomer and M.J. Swift, eds.). John Wiley and Sons, Chichester, UK. Pp. 189-208.
- Rasmussen, P.E. and Albrecht, S.L. 1998. Crop management effects on organic carbon in semi-arid Pacific Northwest soils. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 209-220.
- Reicosky D.C. and Lindstrom M.J. 1995. Impact of fall tillage on short-term carbon dioxide flux. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 177-187.
- Reikosky, D.C. 1998. Tillage methods and carbon dioxide loss: fall versus spring tillage. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 99-112.
- Rezende, C. de P., Cantarutti, R.B., Braga, J.M., Gomide, J.A., Pereira, J.M., Ferreira, E., Tarré, R., Macedo, R., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., Cadisch, G., Giller, K.E. and Boddey, R.M. 1998. Litter deposition and disappearance in Brachiaria pastures in the Atlantic forest region of the South of Bahia, Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (in press).
- Rollinger, J.L., Strong, T.F. and Grigal, D.F. 1998. Forested soil carbon storage in landscapes of the northern Great Lakes region. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 335-350.
- Rosell, R.A. and Galantini, J.A. 1988. Soil organic carbon dynamics in native and cultivated ecosystems of South America. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 11-34.
- Ryan, J. 1998. Changes in organic carbon in long-term rotation and tillage trials in northern Syria. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 285-296.
- Ryan, M. C., Aravena, R. and Gillham, R. W. 1995. The use of ^{13}C natural abundance to investigate the turnover of the microbial biomass and active fractions of soil organic matter under two tillage treatments. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 351-360.
- Sampson, R.N. 1995. The role of forest management in affecting soil carbon: policy considerations. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 339-350.

- Scharpenseel, H.W. and Pfeiffer, E.M. 1998. Carbon turnover in different climates and environments. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 577-590.
- Schlesinger, W.H. 1995. An overview of the carbon cycle. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 9-25.
- Scholes, R.J., Dalal, R. and Singer, S. 1994. Soil physics and fertility: The effects of water, temperature and texture. In: *The Biological Management of Tropical Soil Fertility* (P.L. Woomer and M.J. Swift, eds.). John Wiley and Sons, Chichester, UK. Pp. 117-136.
- Scholes, R.J. and Hall, D.O. 1995. The carbon budget of tropical savannas, woodlands and grasslands. In: *Carbon cycling in forests and grasslands*. Melillo and Bremeyer, eds. SCOPE Vol. John Wiley, Chichester. Scholes, M.C., Swift, M.J., Heal, O.W., Sanchez, P.A., Ingram, J.S.I. and Dalal R. (1994). Soil fertility research in response to the demand for sustainability. In: *The Biological Management of Tropical Soil Fertility* (P.L. Woomer and M.J. Swift, eds.). John Wiley and Sons, Chichester, UK. Pp. 1-14.
- Secretaria Pro Tempore 1995. Proposal of Criteria and Indicators for Sustainability of the Amazon Forest. Secretaria Pro Tempore, Tratado de Cooperación Amazónica. Lima, Peru. 149 pp. (In English, Spanish and Portuguese)
- Secretaria Pro Tempore 1998. Zonification Ecologica-Economica: Una Propuesta Metodológica para la Amazonia. Secretaria Pro Tempore, Tratado de Cooperación Amazónica. Caracas, Venezuela. 272 pp.
- Secretaria Pro Tempore 1998. Propuesta de Fortalecimiento Institucional y Transferencia Tecnológica para la Región Amazónica. Secretaria Pro Tempore, Tratado de Cooperación Amazónica. Lima, Peru. 149 pp.
- Serrão, E. A., Teixeira, L.B., de Oliveria, R.F. and Bastos, J.B. 1995. Soil alterations in perennial pasture and agroforestry systems in the Brazilian Amazon.. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 85-104.
- Serrão, E. A. and Nepstad, D.C. 1996. Pastures on amazonian forestlands: a review of environmental and economic performance. In: *Interdisciplinary Research on the Conservation and Sustainable Use of the Amazonian Rain Forest and its Information Requirements - report on the workshop held in Brasilia, Brazil November 20 - 22, 1995*. (Lieberei, R., Reisdorff, C. and Machado, A.D, eds.). Pp. 221-238.
- Serrão, E.A.S., Nepstad, D. and Walker, R. 1996. Upland agricultural and forestry development in the Amazon: sustainability, criticality and resilience. *Ecological Economics* **18**:3-13.
- Seybold, C.A., Mausbach, M.J., Karlen, D.L. and Rogers, H.H. 1998. Quantification of soil quality. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 387-404.
- Singh, B.R. and Goma, H. C. 1995. Long-term soil fertility management experiments in eastern Africa. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 347-382.
- Singh, B.R., Borresen, T., Uhlen, G., and Ekeberg, E. 1998. Long-term effects of crop rotation, cultivation practices, and fertilizers on carbon sequestration in soils in Norway. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 195-208.
- Smith, P., Powlson, D.S., Glendining, M.J. and Smith, J.U. 1998. Opportunities and limitations for C sequestration in European agricultural soils through changes in management. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 143-152.

- Smyth, T.J. and Cassel, D.K. 1995. Synthesis of long-term soil management research on Ultisols and Oxisols in the Amazon.. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 13-60.
- Solberg, E.D., Nyborg, M., Izaurralde, R.C., Malhi, S.S., Janzen, H.H. and Molina-Ayala, M. 1998. Carbon storage in soils under continuous cereal grain cropping: N fertilizer and straw. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 235-254.
- Sparrow, E.B. and Cochran, V.L. 1995. Effect of soil depth and temperature on CH₄ consumption in subarctic agricultural soils. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 197-204.
- Stevens, A.-D., Jacobi, I. and Gottsberger, G. 1995. Germination and seedling growth in the secondary vegetation of the Eastern Amazon Region. In: *Management and Rehabilitation of Degraded Lands and Secondary Forests in Amazonia*. (John A. Parrotta, J.A. and Kanashiro, M., eds.) International Institute of Tropical Forestry/USDA Forest Service, Río Piedras, Puerto Rico. Pp. 96-100.
- Stevens, A.D., Kessler, B., Elster, C. and Gottsberger, G. 1995. Reproduction and regeneration in the secondary vegetation of Eastern Amazonia. In: *Management and Rehabilitation of Degraded Lands and Secondary Forests in Amazonia*. (John A. Parrotta, J.A. and Kanashiro, M., eds.) International Institute of Tropical Forestry/USDA Forest Service, Río Piedras, Puerto Rico. Pp. 101-107.
- Stewart, B.A. 1995. Soil management in semiarid regions. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 251-258.
- Sullivan, M.D., Fausey, N.R. and Lal, R. 1988. Long-term effects of subsurface drainage on soil organic carbon content and infiltration in the surface horizons of a lakebed soil in northwest Ohio. Soil carbon dynamics in different cropping systems in principal ecoregions of Asia. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 73-82.
- Swift, M.J., Bohren, L., Carter, S.E., Izac, A.M. and Woome, P.L. 1994. Biological management of tropical soils: Integrating process research and farm practice. In: *The Biological Management of Tropical Soil Fertility* (P.L. Woome and M.J. Swift, eds.). John Wiley and Sons, Chichester, UK. Pp. 209-228.
- Tarnocai, D. 1998. The amount of organic carbon in various soil orders and ecological provinces in Canada. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 81-92.
- Teixeira, L.B. y Bastos, J.B. 1989. Nutrientes nos solos de floresta primária e pastagem de *Brachiaria humidicola* na Amazônia Central. Boletim de Pesquisa CPATU No 98. 31 pp.
- Thielen-Klinge, A., Wanisch, A., Denich, M., Santos, M.M.L.S. de and Vlek, P.L.G. 1995. Natural abundance of ¹⁵N in fallow vegetation of northeast Pará state, Brazil - Preliminary results. In: *Management and Rehabilitation of Degraded Lands and Secondary Forests in Amazonia*. (John A. Parrotta, J.A. and Kanashiro, M., eds.) International Institute of Tropical Forestry/USDA Forest Service, Río Piedras, Puerto Rico. Pp. 108-110.
- Thomas, R.J., Fisher, M.J., Ayarza, M.A., and Sanz, J.I. 1995. The role of forage grasses and legumes in maintaining the productivity of acid soils in Latin America.. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 61-83.
- Thornely, J.H.M., Fowler, D. and Cannell, M.G.R.. 1991. Terrestrial carbon storage resulting from CO₂ and nitrogen fertilization in temperate grasslands. *Plant Cell and Environment* **14**:1007-1011.

- Traore, S. and Harris, P.J. 1995. Long-term fertilizer and crop residue effects on soil and crop yields in the savanna region of Côte d'Ivoire.. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 141-180.
- Trujillo, W., Amezquita, E., Fisher, M.J. and Lal, R. 1998. Soil organic carbon dynamics and land use in the Colombian savannas: Aggregate size distribution. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 267-280.
- Uehara, G. 1995. Management of isoelectric soils of the humid tropics. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 271-278.
- Uehara, G., Tsuji, G.Y. and Beinroth, F.H. 1995. Extrapolating results of long-term experiments.. In: *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. (R. Lal and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 105-122. Watson, R., Rodhe, H., Oeschger, H. and Siegenthaler, U.. 1990. *Greenhouse gases and aerosols*. IPCC Section 1, UNEP/WMO.
- Urquiaga, S., Cruz, K.H.S. and Boddey, R. M. 1992. Contribution of nitrogen fixation to sugar cane: Nitrogen-15 and nitrogen-balance estimates. *Soil Science Society of America Journal* **56**:105-114.
- Verma, S.B., Kim, J., Clement, R.J., Shurpali, N.J. and Billesbach, D.P. 1995. Trace gas and energy fluxes: micrometeorological perspectives. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 361-376.
- Vogt, K., Vogt, D.J., Brown, S., Tilley, J.P., Edmonds, R., Silver, W.L. and Siccama, T.G. 1995. Dynamics of forest floor and soil organic matter accumulation in boreal, temperate, and tropical forests. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 159-178.
- Voroney, R.P. and Angers, D.A. 1995. Analysis of the short-term effects of management on soil organic matter using the CENTURY model. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 113-120.
- Vose, J.M., Elliott, K.J. and Johnson, D.W. 1995. Soil CO₂ flux in response to elevated atmospheric CO₂ and nitrogen fertilization: patterns and methods. In: *Soils and Global Change*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 199-208. Wedin, D.A. and Tilman, D. (1996). Influence of nitrogen loading and species composition on the carbon balance of grasslands. *Science* **274**:1720-1723.
- Wang, Z.P., Crozier, C.R. and Patrick, W.H. 1995. Methane emission with and without algae. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 245-250.
- Weigel, A., Klimanek, E.-M., Korschens, M. and Mercik, St. 1998. Investigations to the carbon and nitrogen dynamics of different long-term experiments by means of biological soil properties. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 335-344.
- Wiesenmüller, J., Denich, M. and Vlek, P.L.G. 1995. Vegetative fallow regeneration in the Eastern Amazon Region, Brazil. In: *Management and Rehabilitation of Degraded Lands and Secondary Forests in Amazonia*. (John A. Parrotta, J.A. and Kanashiro, M., eds.) International Institute of Tropical Forestry/USDA Forest Service, Río Piedras, Puerto Rico. Pp. 111-114.
- Woomer, P.L., Martin, A., Albrecht, A., Resck, D.V.S. and Scharpenseel, H.W. 1994. The importance and management of soil organic matter in the tropics. In: *The Biological Management of Tropical Soil Fertility* (P.L. Woomer and M.J. Swift, eds.). John Wiley and Sons, Chichester, UK. Pp. 47-80.

- Woomer, P.L., Palm, C.A., Qureshi, J.N. and Kotto-Same, J. 1998. Carbon sequestration and organic resource management in African smallholder agriculture. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 153-174.
- Woomer, P.L. and Palm, C.A. 1999. An approach to estimating system carbon stocks in tropical forests and associated land uses. *Commonwealth Forestry Review* (In press).
- Woomer, P.L., Palm, C.A., Alegre, J., Castilla, C., Cordeiro, D.G., Hairiah, K., Kotto-Same, J., Moukam, A., Rodrigues, V. and van Noordwijk, M. 1999. Carbon dynamics in slash-and-burn systems and land use alternatives: Findings of the Alternatives to Slash-and-Burn Programme. In: *Carbon Pools and Dynamics in Tropical Ecosystems* (R. Lal, B.A. Stewart and J.M. Kimble, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida (in press).
- Yagi, K., Kumagai, K., Tsuruta, H. and Mianami, K. 1995. Emissions, production, and oxidation of methane in a Japanese rice paddy field. In: *Soil Management and Greenhouse Effect*. (R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 231-243.
- Yakimenko, E.Y. 1998. Soil comparative evolution under grasslands and woodlands in the Forest Zone of Russia. In: *Management of Carbon Sequestration in Soil*. (R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart, eds.). *Advances in Soil Science Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida. Pp. 391-404.

INFORMES SOBRE RECURSOS MUNDIALES DE SUELOS

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

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

67. Digitized Soil Map of the World, Volume 1: Africa. Volume 2: North and Central America. Volume 3: Central and South America. Volume 4: Europe and West of the Urals. Volume 5: North East Asia. Volume 6: Near East and Far East. Volume 7: South East Asia and Oceania. Release 1.0, November 1991.
68. Land Use Planning Applications. Proceedings of the FAO Expert Consultation 1990, Rome, 10-14 December 1990.
69. Dixième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Bouaké, Odienné, Côte d'Ivoire, 5-12 novembre 1990.
70. Ninth Meeting of the East and Southern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Lilongwe, Malawi, 25 November - 2 December 1991.
71. Agro-ecological land resources assessment for agricultural development planning. A case study of Kenya. Resources data base and land productivity. Main Report. Technical Annex 1: Land resources. Technical Annex 2: Soil erosion and productivity. Technical Annex 3: Agro-climatic and agro-edaphic suitabilities for barley, oat, cowpea, green gram and pigeonpea. Technical Annex 4: Crop productivity. Technical Annex 5: Livestock productivity. Technical Annex 6: Fuelwood productivity. Technical Annex 7: Systems documentation guide to computer programs for land productivity assessments. Technical Annex 8: Crop productivity assessment: results at district level. 1991. Main Report 71/9: Making land use choices for district planning, 1994.
72. Computerized systems of land resources appraisal for agricultural development, 1993.
73. FESLM: an international framework for evaluating sustainable land management, 1993.
74. Bases digitales de datos de suelos y terreno a nivel mundial y nacional (SOTER), 1995.
75. AEZ in Asia. Proceedings of the Regional Workshop on Agro-ecological Zones Methodology and Applications, Bangkok, Thailand, 17-23 November 1991.
76. Green manuring for soil productivity improvement, 1994.
77. Onzième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Ségou, Mali, 18-26 janvier 1993.
78. Land degradation in South Asia: its severity, causes and effects upon the people, 1994.
79. Status of sulphur in soils and plants of thirty countries, 1995.
80. Soil survey: perspectives and strategies for the 21st century, 1995.
81. Multilingual soil database, 1995.
82. Potential for forage legumes of land in West Africa, 1995.
83. Douzième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Bangui, République Centrafricain, 5-10 décembre 1994.
84. Base referencial mundial del recurso suelo, 1999.
85. Soil Fertility Initiative for sub-Saharan Africa, 1999.
86. Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean, 1999.
87. AEZWIN: An interactive multiple-criteria analysis tool for land resources appraisal, 1999.
88. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂, 2000.

** Agotado

La prevención de la degradación de la tierra, el mejoramiento de la fertilidad de los suelos, el fortalecimiento del secuestro de carbono y la conservación de la biodiversidad por medio del cambio del uso y del manejo sostenible de la tierra son temas prioritarios para la FAO en la región de América Latina y el Caribe. Este documento pretende contribuir a la formulación de una estrategia para la valoración de los sistemas de uso de las tierras de los trópicos húmedos a partir de los estudios disponibles de secuestro de carbono de la atmósfera, indicando posibilidades reales para la ejecución de cambios de uso de la tierra que puedan optimizar los múltiples objetivos de los usuarios de la tierra.

La prevención de la degradación de la tierra, el mejoramiento de la fertilidad de los suelos, el fortalecimiento del secuestro de carbono y la conservación de la biodiversidad por medio del cambio del uso y del manejo sostenible de la tierra son asuntos prioritarios para la FAO en la región de América Latina y el Caribe.

Esta publicación pretende contribuir a la formulación de una estrategia para la valoración de los sistemas de uso de las tierras de los trópicos húmedos a partir de los estudios disponibles de secuestro de carbono de la atmósfera, indicando posibilidades reales para la ejecución de cambios de uso de la tierra que puedan optimizar los múltiples objetivos de los usuarios.

ISBN 92-5-304412-8 ISSN 1020-430X



9 789253 044122

X4590S/1/3.00/850