



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



CENTRO DE AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE

DIRECCION ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

CUANTIFICACIÓN DEL CARBONO SECUESTRADO POR ALGUNOS
SISTEMAS AGROFORESTALES Y TESTIGOS EN TRES PISOS
ECOLÓGICOS DE LA AMAZONÍA DEL PERÚ.

T E S I S

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:
MAESTRO EN CIENCIAS EN
AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

P R E S E N T A:

DANIEL ALBERTO CALLO CONCHA

BIBLIOTECA CENTRAL U. A. C.

Chapingo, Edo. de México, septiembre del 2001

BIB 96298

**CUANTIFICACIÓN DEL CARBONO SECUESTRADO POR ALGUNOS SAF'S Y
TESTIGOS EN TRES PISOS ECOLÓGICOS DE LA AMAZONÍA DEL PERÚ.**

Tesis realizada por **Daniel Alberto Callo Concha**, bajo la dirección del comité asesor indicado, aprobado por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE

DIRECTOR:



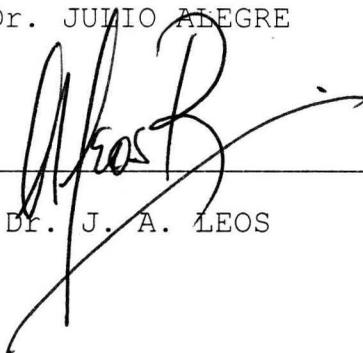
Dr. L. KRISHNAMURTHY

ASESOR:



Dr. JULIO ALEGRE

ASESOR:



Dr. J. A. LEOS

**CUANTIFICACIÓN DEL CARBONO SECUESTRADO POR ALGUNOS SAF'S Y
TESTIGOS EN TRES PISOS ECOLÓGICOS DE LA AMAZONÍA DEL PERÚ.**

El jurado que revisó y aprobó el grado de **Daniel Alberto Callo Concha**, autor de la presente tesis de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, estuvo constituido por:

DIRECTOR: 

Dr. L. KRISHNAMURTHY

ASESOR: 

Dr. JULIO ALEGRE

ASESOR: _____

Dr. J. A. LEOS

A Mamá, Papá e Hildita, naturalmente.

DATOS BIOGRÁFICOS

- 1 972 Nace en Cusco, Perú.
- 1 978-1 983 Estudios primarios, Colegio nacional de Ciencias. Cusco, Perú.
- 1 984-1 988 Estudios secundarios, Colegio Nacional de Ciencias. Cusco, Perú.
- 1 989-1 995 Estudios profesionales, Facultad de Agronomía y Zootecnia; Universidad Nacional de San Antonio Abad. Cusco, Perú.
- Experiencia pre-profesional: inventario de recursos, control de polinización, abonos orgánicos, colección de germoplasma, manejo post-cosecha.
- 1 995-1 998 Desarrollo profesional. Consultoría nacional e internacional (Bolivia).
- Experiencia profesional: conservación de suelos, inventario y diagnóstico en cuencas, costos de producción, evaluación de impacto, creación y gestión de base de datos especializadas.
- 1 999-la fecha Estudios post-profesionales. Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible; Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

AGRADECIMIENTOS

- Al pueblo mexicano y su generosa hospitalidad.
- Al Dr. Krishnamurthy, por todo esto.
- A la Doña Margarita y Don Lorenzo Meléndez López, por su interminable amparo y mejor buena voluntad.
- A tía Mago, tío Leo y las niñas, por el abrigo afectivo de entonces y de siempre.
- A la Red de Formación Ambiental del PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), particularmente al Dr. Enrique Leff coordinador de UCORED (Red de Formación Ambiental para América Latina). Por su apoyo parcial durante la fase académica.
- A las Fundaciones Ford y Rockefeller. Por sus donativos a los proyectos de investigación dirigidos por el Dr. L. Krishnamurthy, que permitieron la exitosa conclusión de éste estudio.
- Al CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología), México. Por su soporte parcial, a través del Proyecto 32778-B "Investigación participativa sobre los Barbechos Mejorados para el mejoramiento de la milpa en la zona Maya", bajo la dirección del Dr. L. Krishnamurthy.
- A la Universidad Autónoma Chapingo, solícita proveedora y hornacina pertinente.
- Al Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, por las innumerables oportunidades.
- Al Programa de Maestría y su staff, particularmente a Lolita Coronel y la M.C. Elsa Cervera, inconmensurablemente gentiles.

- A mis amigos aquí, buenos compañeros y mejores personas.

- Al ICRAF (Centro Internacional para la Investigación en Agroforestería) en su sede para Latinoamérica: Pucallpa-Ucayali, Perú, por el soporte logístico durante la fase de campo.
- Al Dr. J. Alegre, co-líder ICRAF-Latinoamérica, por su valiosa supervisión. Las facilidades otorgadas en virtud a su decisión política son plenamente reconocidas.
- Al equipo de ICRAF-Pucallpa, particularmente a su líder Luis Arévalo, su gestión logística, "expertise" y calidad humana resultaron fundamentales para el logro de los productos académicos y mi feliz estadía en la Amazonía; a Abel Meza por sus diligencias locales y hospitalidad; a Carlos Soto por la premura y eficiencia en los análisis de laboratorio; a Leví Fasabi por su compromiso en la colección de información de campo.
- Al INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) Pucallpa y su Director: Auberto Ricse, la concesión de recursos humanos y logísticos fue invaluable; a Tulio Amasifuen y Walter Angulo y su desinteresado apoyo en la recolección de campo.
- A Arnulfo Saavedra, Luis Domínguez, Oscar Cotrina y Flor González, su contribución en campo es ampliamente apreciada.
- A los agricultores de San Agustín, Previsto y Aguaytía amables prestadores de los espacios para el muestreo.

ÍNDICE

Dedicatoria	iv
Datos biográficos	v
Agradecimientos	vi
Indice	viii
Indice de cuadros	xi
Indice de figuras	xiii
Resumen	xiv
Summary	xv
I. Introducción	1
1. El problema	1
2. Justificación	2
3. Hipótesis	3
4. Objetivos	4
5. Alcances	4
6. Limitaciones	5
II. Revisión de Literatura	7
1. Antecedentes	7
<i>El cambio climático</i>	7
<i>El efecto de invernadero</i>	8
<i>Gases de efecto de invernadero (GEI)</i>	9
<i>Incremento de emisiones y causas</i>	10
<i>Políticamente</i>	12
<i>El desequilibrio fundamental</i>	15
2. Base teórica	17

<i>El dióxido de carbono</i>	17
<i>Prospectiva</i>	19
<i>Algunos de los efectos modelados</i>	19
<i>Algunos casos particulares</i>	21
<i>Qué hacer?</i>	22
<i>Biomasa y carbono</i>	25
3. La Agroforestería	28
III. Materiales y Metodología	33
El sitio	33
Los tratamientos	35
Fundamento	36
Medición en campo	37
Cálculos	39
Determinación del carbono orgánico en el suelo	41
Análisis estadístico	42
IV. Resultados	43
Carbono arbóreo	43
Carbono arbustivo-herbáceo	45
Carbono hojarasca	46
Carbono edáfico	47
Carbono total	47
Carbono gestionable	48
Carbono fragmentado	50
Carbono por localidades	51

V. Discusión	53
Premisas	53
Hipótesis fundamental	53
Hipótesis complementaria 1	55
Hipótesis complementaria 2	55
Hipótesis complementaria 3	57
Adicionalmente	58
VI. Conclusiones	59
VII. Literatura citada	61
Apéndice 1	67
Apéndice 2	69
Apéndice 3	71
Apéndice 4	72

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Equilibrio térmico en la tierra (unidades de radiación solar) _____	9
Cuadro 2. Porcentaje, concentración e incremento de gases de efecto de invernadero _____	10
Cuadro 3. Ratios de confrontación por aporte de CO ₂ , entre países en desarrollo y desarrollados _____	16
Cuadro 4. Biomasa por tipo de bosque _____	27
Cuadro 5. Volúmenes de carbono secuestrado por Varios SUT's _____	29
Cuadro 6. Volumen de carbono por recipiente (tha ⁻¹) _____	31
Cuadro 7. Porcentaje relativo de carbono almacenado, secuencia: antes RTQ, después RTQ e instalación de pastura, biomasa aérea, radicular y edáfica _____	32
Cuadro 8. Porcentaje relativo de carbono en el Suelo, entre 0 y 20 cm. Varios SUT's, en relación a un bosque primario no disturbado _____	32
Cuadro 9. Latitud y altitud media de las localidades del estudio _____	33
Cuadro 10. Comparación de medias del carbono en árboles en pie (tha ⁻¹) _____	43
Cuadro 11. Comparación de medias del carbono en árboles caídos (tha ⁻¹) _____	44
Cuadro 12. Comparación de medias del carbono arbustivo-herbáceo (tha ⁻¹) _____	45
Cuadro 13. Comparación de medias del carbono en la hojarasca (tha ⁻¹) _____	46
Cuadro 14. Comparación de medias del carbono edáfico (tha ⁻¹) _____	47

Cuadro 15. Comparación de medias del carbono total (tha ⁻¹) _____	48
Cuadro 16. Comparación de medias del carbono gestionable (tha ⁻¹) _____	49
Cuadro 17. Comparación de medias del carbono por localidades (tha ⁻¹) _____	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de las emisiones de carbono fósil a la atmósfera_____	11
Figura 2. Aporte porcentual de GEI por grupos de actividades _____	12
Figura 3. Progresión de emisiones netas de CO ₂ _____	18
Figura 4. Distribución de la biomasa forestal_____	26
Figura 5. Huánuco y Ucayali en el Perú y América Latina_____	29
Figura 6. Carbono por SUT y fuente _____	49
Figura 7. Carbono total por SUT _____	50

RESUMEN

Cuantificación del carbono secuestrado por algunos SAF's y testigos, en tres pisos ecológicos de la Amazonía del Perú.

Daniel Callo-Concha
(Bajo la dirección de L. Krishnamurthy)

Palabras clave: sistemas agroforestales, sistemas de uso de la tierra, secuestro de carbono.

En la región amazónica del Perú y durante el segundo semestre del 2 000, evaluamos los volúmenes de carbono secuestrado en seis tratamientos, sistemas agroforestales y/o sistemas de uso de la tierra: bosque primario, bosque secundario, café bajo sombra, silvopastura, pastura y huerto casero en tres variantes ecológicas (repeticiones), fragmentando el muestreo en: a) biomasa arbórea, b) biomasa herbácea, c) hojarasca y d) varios estratos de suelo.

En lo que se refiere a carbono total, el tratamiento parámetro: bosque primario, reteniendo $465,8 \text{ tC ha}^{-1}$, supera en 58% a los SAF's: huerto casero y café + sombra; en 74,3% al cuarto, SAF silvopastura y 80% al otro testigo extremo: pastura. Sin embargo todos éstos, más el bosque de regeneración, son estadísticamente iguales e inferiores al bosque primario ($p < 0,01$).

Resultó sumidero estable ($p < 0,01$) y considerable, el suelo. Retiene en casi todos los casos -a excepción del bosque primario - más de la mitad del carbono total. Existe una proporcionalidad inversa entre los sumideros arbóreo y edáfico, función de su grado de cobertura arbórea; los aportes de biomasa herbácea y arbustiva (fresca y hojarasca), son pobres, fluctuando entre el 1 y 2% y los provenientes de árboles muertos, considerables pero oscilantes en los tratamientos b. primario, b. secundario y SAF café+sombra. Las diferencias de carbono secuestrado se deben exclusivamente a la proporción de la cobertura otorgada por la biomasa arbórea ($p < 0,05$).

ABSTRACT

Carbon quantification by some agroforestry systems and parameters in three ecological sites of peruvian amazonia

By: Daniel Callo-Concha
(Under the direction of L. Krishnamurthy)

Key words. agroforestry systems, land use systems, carbon sequestration.

In the peruvian Amazonia and during the second semester of 2000, we evaluate the volumes of carbon sequestered by six agroforestry systems and/or land use systems: primary forest, regeneration forest, coffee+shade, pasture+trees, pasture and homegarden. In three ecological situations (blocks). We had consider for the total sample, a) tree biomass, b) herbaceous and arbustive biomass, c) litter and d) soil.

About the total carbon, the parameter primary forest, stored $465,8 \text{ tC ha}^{-1}$, overcomes in 58% to the treatments: homegarden and coffee+shade, in 74,3% to the fourth: pasture+trees and 80% to the other parameter, pasture. However, those ones plus regeneration forest are statistically similar and less than the primary forest. ($p < 0,01$).

The soil was the most stable drain ($p < 0,01$), it retain in all cases -except primary forest- more than the half of total carbon. The increments are proportionally inverse between the tree and soil drains, it depend of the trees covering with which they count; the contributions of the rest of vegetative biomass (herbs, shrubs and litter) vary in 1 to 2%; the provided for death trees are considerably high but changeable in treatments: primary forest, regeneration forest and coffee+shade. So, the differences depend exclusively of the proportion of the arboreal biomass ($p < 0,05$).

I. Introducción

1. El problema

Las propiedades físicas y químicas de la Atmósfera resultan de su composición, a la vez que determinan su función principal: proteger y mantener la sostenibilidad de la biosfera (esfera de vida). Siendo fluida y dinámica, sus variaciones suelen ser causales, por ello los patrones que sigue determinarían el clima.

Los regímenes climáticos, tradicionalmente regulares, definen y habrían definido las actividades humanas en toda escala demográfica. Se consideran dos grupos de cambios: a. Los que se dan en largos períodos de tiempo e intervalos similares, las glaciaciones por ejemplo y b. Los violentos, breves y generalmente nocivos, tormentas y huracanes, por citar unos.

Siendo la atmósfera un sistema complejo, mantiene una intensa interrelación entre sus factores-componentes, ergo, alteraciones en ella redundarían en la homeostasis del sistema.

Hasta ahora, la atmósfera se había considerado inmune a disturbios antropógenos, pero recientemente, los signos y síntomas apreciados han cambiado esta apreciación drásticamente, la temperatura media planetaria es 0,5 °C mayor a la del siglo pasado, cinco de los años más calientes de la historia se han concentrado en los '80, los patrones climáticos cada vez son más obsoletos.

Tales cambios, se han atribuido al aumento de las concentraciones de los **gases de efecto de invernadero**

(GEI), resultado de su creciente emisión humana. El fenómeno: **calentamiento global**.

2. Justificación

Dentro de un proyecto mayor de estabilización, se ha propuesto recapturar los GEI y preservarlos a fin de alcanzar un nuevo equilibrio.

El **secuestro de carbono**. Aprovechando el intercambio gaseoso, fenómeno peculiar al proceso fotosintético de los vegetales, se plantea almacenar el carbono atmosférico, como carbono orgánico y además introducirlo al suelo.

Todo **sistema de uso de la tierra (SUT)**, en teoría es un sumidero potencial, la sola presencia de vegetales en sí, lo avala. El grado de acumulación sería función de su densidad y su secuenciación temporal; es decir, manejo.

La Agroforestería, como paradigma tecno-productivo, versátil y polifuncional, que integra imprescindiblemente al componente leñoso -mayor recipiente vegetal potencial-, se constituiría bajo estas consideraciones, en una opción de uso de la tierra especialmente atractiva. Esta aptitud es mayor aún en condiciones tropicales, donde los sistemas tradicionales de agricultura migratoria RTQ, basados en la gestión del componente arbóreo, son inherentes.

Este estudio a eso enfoca, la evaluación y comparación de diversos SUT's genéricamente, **Sistemas Agroforestales (SAF's)** específicamente, en su aptitud para secuestrar carbono. Discusión y elucubraciones consecuentes.

3. Hipótesis

Partimos de la idea fundamental de que los SAF's por sus calidades inherentes: mayor volumen de biomasa relativa y ubicuidad del componente leñoso, deberían ser capaces de secuestrar una mayor cantidad de carbono en relación a otros sistemas de uso de la tierra. Así, la contrastación con éstos y testigos extremos: bosque primario no disturbado y pastura, nos daría una idea de su potencial relativo. Luego:

Hipótesis fundamental. Los Sistemas Agroforestales son capaces de secuestrar mayor volumen de carbono, en relación a los Sistemas ortodoxos-locales de Uso de la Tierra.

Adicionalmente, consideramos algunas premisas, que intentaríamos corroborar.

La floresta (bosques naturales) concentra el mayor volumen y densidad de biomasa vegetal, en virtud de ello, su gradiente de acumulación es también considerable. Los espacios tropicales son particularmente relevantes, por concentrar la mayor reserva de fitomasa planetaria. Entonces:

Hipótesis complementaria 1. Los bosques tropicales retienen más carbono que cualquier otro ecosistema.

Los bosques viejos y primarios (naturales, vírgenes,...) han logrado su máxima capacidad de acumulación y se han mantenido en ella. Por otro lado, los bosques secundarios (de regeneración), en su dinámica, vigorizan la captura y liberación de carbono, resultando en el mediano plazo más eficientes. Consiguientemente:

Hipótesis complementaria 2. Considerando su dinámica espacio-temporal, fijan más carbono los bosques secundarios, que los bosques primarios y/o maduros.

Dados los mecanismos de generación, intercambio e incorporación de biomasa -y por tanto de carbono- al suelo, su volumen debe ser sustantivo. En cuanto la metodología considera muestrear hasta un metro de profundidad y por tanto estimar prismas de suelo mayores, el estudio debería aportar alguna información al caso. Ulteriormente:

Hipótesis complementaria 3. Entre la tercera parte y la mitad del total de carbono retenido por un SUT tropical se registra en el suelo.

4. Objetivos

1. Cuantificar el volumen de carbono secuestrado por algunos Sistemas Agroforestales relevantes y parámetros.

2. Determinar la proporción relativa de aporte de carbono de cada componente en el Sistema.

5. Alcances

- Acercamiento a la generación de metodologías más eficientes de cuantificación de carbono secuestrado, particularmente locales.

- Provisión de argumentos técnicos que sustenten decisiones políticas (desarrollo sostenible).

- Argumentar una plataforma de medidas técnicas en la política macro de estabilización climática.

6. Limitaciones

- Los SAF's nominados no son todos los existentes, por variabilidad y logística, no es posible cubrir con todos, se trata apenas de una muestra. Esto desmerece la capacidad de extrapolación de resultados.
- Insuficiente numero de repeticiones, en algunos casos la proximidad de las parcelas, ensucia la calidad y dispersión necesaria para la representatividad de la muestra.
- Dado lo dificultoso que resultaba el muestreo de raíces, se prefirió dejarlo de lado. Asumimos la idea que entre ambas existe una diferencia, constante, que debería permanecer en la misma medida que entre las muestras de biomasa epígea.
- Los análisis de laboratorio consideran solamente el carbono orgánico, así cierta proporción de carbono no es estimada.
- La profundidad de muestreo no basta para considerar el volumen absoluto de carbono edáfico existente.
- El análisis es puntual, es decir en un lugar-momento, sin considerar su dinámica de variación.
- La existencia de diversos modelos alométricos de limitada aplicabilidad de extrapolación es riesgosa y discutible. Los modelos usados, se han diseñado para bosques maduros, como el de Brown, esbozado para árboles de entre 10 y 25 cm de diámetro. Indica esto, que la fórmula sobrestima la cantidad de carbono en árboles con menos de 25 cm de diámetro, entre los que están la mayor parte de

los bosques secundarios, barbechos y Agroforestería [Palm s/f]. Ecuaciones desarrolladas para barbechos jóvenes, Ketterings y Van Noordwijk para Indonesia; Palm y Scott para el Perú, estiman aproximadamente la mitad que la de Brown, aparte de otros estudios que aportan varios modelos para diversas condiciones [Palm, s/f].

II. Revisión de Literatura

1. Antecedentes

Los procesos de liberación y secuestro de carbono no son recientes, son fenómenos cotidianos y se dan desde siempre. En anteriores períodos de la historia geológica de la tierra, el dióxido de carbono ha sido capturado como carbón, gas y petróleo, lo evidencian los sedimentos calcáreos correspondientes a tales eras. [FAO, 1 993, cit. por López, 1 998]

Ahora, las cuotas de emisión y secuestro son tales que han llegado a afectar el equilibrio atmosférico y por tanto biosférico del planeta, veamos:

El cambio climático; calentamiento global

Son muchos los factores que configuran del clima, los más determinantes hasta ahora han sido los cósmicos: intensidad solar, declinación del eje terrestre, enfriamiento del núcleo terrestre, etc. Producto de ello son los ciclos climáticos relativamente prolongados: glaciaciones, variaciones en el nivel del mar, etc.

Debe quedar claro que el calentamiento global es un fenómeno acumulativo; el hombre ha venido emitiendo GEI cotidianamente desde que aparece, en un proceso continuo, que se ha incrementado en los últimos dos siglos. [IPCC, 1 995]

En los últimos 10 000 años la temperatura ha variado muy ocasionalmente, los cambios han sido del orden de 1 y 2 °C y sus consecuencias en la habitabilidad humana, graves pero transitorias. Desde finales del siglo XIX la temperatura ha

subido de 0,3 a 0,6 °C [IPCC, 1 995], el ratio de incremento actual de 0,3 °C por década, es de 10 a cien veces mayor a los de hace 10 000 años. [Brian 1 996 cit. por Parlamento Latinoamericano *et.al*, 1 998]. Un ascenso de 2,5 a 3 °C, modelado para el siglo presente, excedería cualquier cambio anterior. [UNEP y GMS, 1 992]. El incremento térmico, detona con la misma gravedad los demás factores climáticos conexos: precipitaciones, vientos, etc. [IPCC, 1 995].

El efecto de invernadero

La luz solar arriba a la tierra en forma de radiaciones de onda corta -ultravioleta-, en su ruta puede ser reflejada al espacio por la superficie terrestre y atmósfera o persistir en ella, generando, manteniendo y liberando calor lentamente, en forma de radiaciones de onda larga -infrarroja-.

La longitud de onda irradiada es función de la temperatura del medio, que normalmente corresponde al espectro visible (600 nm). A mayores temperaturas, el caso de un invernadero por ejemplo, las radiaciones tienden al infrarrojo y a menores al ultravioleta. La atmósfera hace de filtro, permitiendo el paso de las radiaciones diferencialmente, de acuerdo a su longitud de onda, al ser las residuales más, la temperatura deberá incrementarse y con ello los demás factores climáticos buscando un nuevo equilibrio térmico. [UNEP y GMS, 1 992]

Cuadro 1. Equilibrio térmico en la tierra (unidades de radiación solar).

Entrante -del espacio a la superficie de la tierra y atmósfera- (*)	100 un.
-Absorbida por la superficie de la tierra	46
-Reflejada al espacio por la superficie de la tierra (1)	6
-Absorbidas por la atmósfera -calentamiento- (2)	23
-Reflejada al espacio por la atmósfera (3)	25
Saliente -de la superficie de la tierra a la atmósfera y espacio-	146 un.
-Transmitidas directamente al espacio (4)	9
-Absorbidas por la atmósfera (5)	106
-Convección en la atmósfera (6)	31
En la atmósfera (7)	160 un.
-Absorbida por la atmósfera -calentamiento- (2)	23
-De la convección de la atmósfera (6)	31
-De la absorbida por la atmósfera (5)	106
La que queda en la atmósfera	100 un.
-En la atmósfera (7)	160
-La que sale al espacio -permitida por los gases de invernadero- (8)	60
Los que compensan las salidas y entradas en la atmósfera	0 un.
-Entrante (*)	100
-La que sale al espacio (8)	-60
-La reflejada al espacio por la atmósfera (3)	-25
-La reflejada al espacio por la superficie terrestre (1)	-6
-la transmitida directamente al espacio (4)	-9
La que se distribuye y permanece en la atmósfera	100 un.

Fuente: Elaborado en base a, Los gases que producen el efecto de invernadero (cambio climático global). [UNEP y GMS, 1 992]. (*) Es crucial el papel desempeñado por los gases de efecto de invernadero: filtrando las 106 un. mantenidas por la tierra (5), liberando apenas 60 un. (8) y reteniendo 46 -"efecto de invernadero"- . Que sumadas a las 23 un. del calentamiento (2) y 31 un. de la convección (6) alcancen las 100 un. que equilibran el sistema.

Gases de efecto de invernadero (GEI)

Las sustancias que hacen posible esta persistencia de radiaciones son los "gases de efecto de invernadero": dióxido de carbono CO₂, metano CH₄, óxido nitroso N₂O, clorofluorocarbonos CFC's, ozono O₃ y vapor de agua H₂O entre los más abundantes. Estos capturan la radiación reflejada, impidiendo su disipación y complementados con

fenómenos de transporte de energía, generan el equilibrio térmico que hace posible la vida en la tierra. Sin la ocurrencia de este fenómeno la temperatura de la tierra sería alrededor de 30 °C menor a la media actual. [IUCC y PNUMA, 1 995]

Tradicionalmente las actividades por la que el hombre añade GEI al ambiente han sido: la quema de combustibles fósiles y la de bosques, generando dióxido de carbono fundamentalmente. Más recientemente, se han identificado algunas otras, como la industria, ganadería extensiva, el cultivo de arroz en pozas e industria. Que añaden enormes volúmenes de clorofluorocarbonos, metano y oxido nitroso.

Cuadro 2. Porcentaje, concentración e incremento de gases de efecto de invernadero(*)

Gases	Contribución relativa (%)	Concentración atmosférica (ppbv)	Tasa anual de incremento (%)
Dióxido de carbono	49	344,000	0,4
Metano	18	1,650	1,0
Clorofluorcarbonos	14	0,63	5,0
Oxido nitroso	6	304	0,25
Ozono	13	Variable	0,25 ppvm
Monóxido de carbono		Variable	0-2
Cloroformo metílico		0,13	7,0

Fuente: Elaborado en base a: Los gases que producen el efecto de invernadero (cambio climático global). [UNEP y GMS, 1 992]; La lucha contra el Cambio Climático: el compromiso del Parlamento Latinoamericano [Parlamento latinoamericano *et.al*, 1 998].

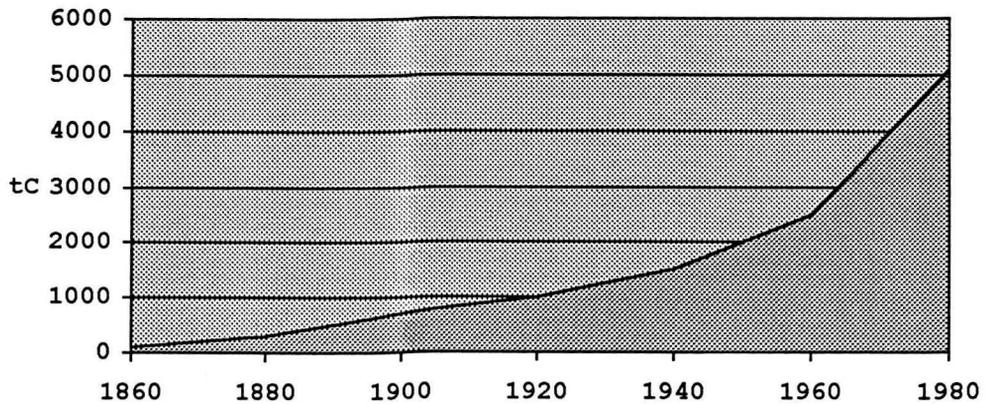
(*) Además de estos, es fundamental el vapor de agua, que cubre con el 90% de los volúmenes de absorción atmosférica.

Incremento de emisiones y causas

En la historia reciente, más específicamente a partir de la era preindustrial, aproximadamente 1 750 DC, los índices de concentración de GEI, han crecido considerablemente: las concentraciones de dióxido de carbono han variado de 280 a

360 ppmv, de metano de 700 a 1 720 ppbv y de N₂O 275 a 310 ppbv; son más recientes inclusive, el ozono troposférico y sus precursores químicos. [IPCC, 1 995]

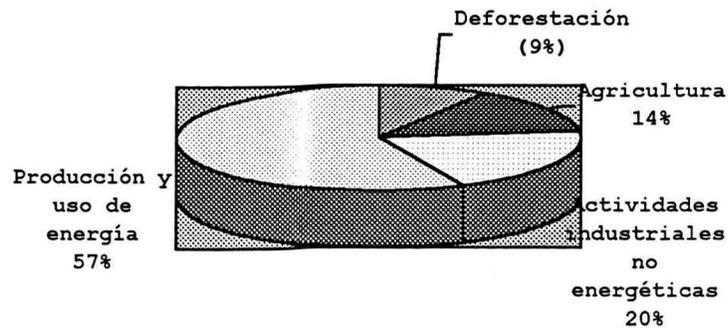
Figura 1. Evolución de emisiones de carbono fósil a la atmósfera



Fuente: Los gases que producen el efecto de invernadero (cambio climático global). [UNEP y GMS, 1 992]

El aporte desequilibrante de estos GEI, provendría de la industria y las tendencias crecientes de cambio de uso de la tierra [IUCC y PNUMA, 1 995]. En el primer caso, lo evidencian la concordancia de curvas entre los niveles de emisión y las depresiones económicas post-guerra y la crisis política energética de los '80 [UNEP y GMS, 1 992]. Y en el segundo, el historial de los ratios de deforestación masiva e inventarios de bosques [FAO, 1 993 cit. por López, 1 998], todos relacionados entre sí por actividades antrópicas [Parlamento Latinoamericano et.al, 1 998].

Figura 2. Aporte porcentual de GEI por grupos de actividades



Fuente: La lucha contra el Cambio Climático: el compromiso del Parlamento Latinoamericano [Parlamento latinoamericano et.al, 1 998]

Políticamente

La implícita consideración, que asumía al ambiente como recipiente ilimitado de subproductos urbanos e industriales, a la luz de lo apreciado ha resultado una falacia. Los primeros estudios al caso surgen a fines de los '70, con la creación del PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), que por solicitud de la SMM (Sociedad Mundial de Meteorología) realiza un estudio-diagnóstico basándose en elementos estrictamente científicos, que alcanzó como conclusión principal: que al ritmo actual de emisión los volúmenes de CO₂ deberían duplicarse para el 2 030 y su efecto -sinérgico con el de otros GEI-, alterar a la estabilidad climática, redundando en un acumulativo calentamiento biosférico. [UNEP y GMS, 1 992; IUCC y PNUMA, 1 995; CMNUCO, 1 997].

En 1 988 el PNUMA y la SMM establecen el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC -siglas en inglés-, delegándosele desarrollar conceptos científicos, económicos, sociales y estrategias

de respuesta, sobre el estado y evolución del cambio climático planetario que se perfilaba. En función a la información primaria recabada, han modelado algunos escenarios: para el 2100, incrementos de 1 a 3,5 °C en la temperatura media, de 0,15 a 0,95 m el nivel medio del mar, de 7 a 11 % en las tasas de precipitación- evaporación, desplazamientos de los casquetes polares, entre 150 y 550 Km, etc. [IPCC, 1 995], además de innumerables consecuencias biofísicas y socioeconómicas.

Los ecosistemas extremarían sus condiciones ambientales con consecuencias como: migración suplantación, padecimiento y extinción de especies; epidemias y pandemias, agrícolas y humanas; erosión, sequía y desertificación de suelos; variaciones en los patrones, producción y productividad; alteraciones en las condiciones y pautas de habitabilidad humanas, etc. [UNEP y GMS, 1 992; IPCC, 1 995; Woodwell cit. por Parlamento Latinoamericano, *et.al*, 1 998].

En 1 990, producto de la Segunda Conferencia Mundial sobre el Clima, proponen la Convención Marco Sobre el Cambio Climático. Las principales consideraciones incluían conceptos como: a) considerar el tema como "preocupación común de la humanidad", b) asignar "responsabilidades comunes pero diferenciadas", función del grado de desarrollo -y subsecuente contribución de polutantes- y c) el "principio de precaución", que afirma que la no certeza científica de afectación, no puede usarse como excusa para la inacción. [CMNUCO, 1 997]. Esta se firma recién -por 154 jefes de Estado más la Unión Europea- en La cumbre de la Tierra "Río '92", asumiéndose como marco de acción y respuesta. Se comprometieron además a realizar reuniones periódicas de monitoreo de medidas y acuerdos. En 1 994,

los países desarrollados aceptaron el compromiso no vinculante, por el que adoptarían las medidas necesarias para en el 2 000, reducir las emisiones de GEI a sus niveles de 1 990.

En marzo de 1 995 con el establecimiento de la Conferencia de las Partes (CDP), se polariza la discusión, entre países en desarrollados -no polutantes o pobremente- y los desarrollados -muy contaminantes-. La CDP-1, establece el Grupo *Ad-Hoc* sobre el Mandato de Berlín, para que revise el cumplimiento de los compromisos de reducción de emisiones y prepare un instrumento jurídico que lo amplíe y refuerce.

En la CDP-3 (Kyoto '97), la negociación se amplía, recibe además varios bloques de "aliados estratégicos", como Unión Europea, JUSSCANNZ (países desarrollados no pertenecientes a la UE), Países con economías en transición, AOSIS, (Alianza de Pequeños Estados Insulares), OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo), etc. Mientras que los países en desarrollados demandan el cumplimiento de compromisos contraídos por los países desarrollados, que defienden cierta diferenciación y flexibilidad en su aplicabilidad, posponiendo la firma de acuerdos definitivos y sugiriendo medidas alternativas como: a) Negociación de emisiones (un país que exceda su cuota de emisiones compraría a otro la que no hubiese empleado), b) Ejecución conjunta (un país recibe créditos "de emisión", al financiar reducciones en otro) y c) períodos presupuestarios de varios años ("alivianar" las metas, financiándolas en períodos mayores). Intentando instaurar un "mercado de carbono", que use como moneda los certificados de reducciones, CTO's -siglas en inglés- [Segura, 1 999].

Esta es la faceta que mayor desarrollo ha alcanzado, en el caso de los Estados Unidos, incentivando mercados de carbono locales [USDA y NRCS, 2 000]. Costa Rica, que ha logrado 900 000 ha. de bosques protegidos, que en promedio almacenan 36 millones tC., aparados en la ley 7575, que compensa a los propietarios de bosques por "servicios ambientales" [Araya 1 998 cit por López, 1 998]. Y organizaciones no gubernamentales, empresas o grupos de ellas, que promueven aprovechamiento múltiple y sostenible de bosques: gestión de áreas agrícolas, reservas de agua, biodiversidad, rehabilitación de zonas degradadas, etc. [WRI, 2 000]. Infortunadamente, no se existe la misma voluntad política, en el caso de reducción de emisiones, en las últimas CDP's (La Haya 2 000 y Bonn 2 001), Los Estados Unidos aliándose con Japón y países de economías emergentes como China, se afirmaron en su posición no-reduccionista, en contra de la actitud de los restantes países desarrollados, generando con ello el fracaso de las negociaciones y posponiendo la ratificación de protocolo de Kyoto una vez más, que para regir debe ser ratificado por 55 países y que a su vez sumen a menos el 55% de las emisiones de los países desarrollados.

El desequilibrio fundamental

El debate político de responsabilidades, contempla las dos dimensiones fundamentales: procedencia y consecuencia. De otra manera, distribución de daños y medidas de mitigación [IUCC y PNUMA, 1 995]. Consideremos,

1. Que los países ricos que sustentan sus elevados estándares de vida en la industrialización, cuestionen hoy el de los menos ricos y su derecho a ello. Cómo podrían

desarrollar éstos al aceptar la disminución de su consumo de combustibles fósiles, cuando estos son los más baratos y fáciles de usar industrialmente?

2. Que los países pobres, de economías débiles e impedidas, poco preparadas para las contingencias consecuencia del calentamiento global, las asuman por igual. Por qué deberían pagar una factura que nunca consumieron?

3. Que en diverso grado, unas comunidades resultarán más vulnerables que otras, puesto que el grado en el que el cambio climático sea nocivo para el sistema, no es sólo función de su agresividad, ni la sensibilidad del sistema, sino además de su capacidad de adaptación. Y esta depende de los recursos con que cuenten para ello. No es justo que los países ricos, principales generadores, co-asuman los costos de atenuación en los países pobres?

Cuadro 3. Ratios de confrontación por aporte de CO₂, entre países en desarrollo y desarrollados.

Ratio	Países desarrollados	Países en desarrollo
Emisión per cápita de combustibles fósiles (t año ⁻¹)	2,8	0,5
Índice: energía por retribución monetaria por quema de combustibles fósiles (t mil ⁻¹ US\$)	0,3	0,5
Índice: energía por retribución monetaria por cambio de uso del suelo (t mil ⁻¹ US\$)	0,27	0,41
Poder adquisitivo de equivalentes de paridad (mil ⁻¹ US\$)	0,26	0,16

Fuente: Segunda evaluación, Cambio Climático 1 995. Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. [IPCC, 1 995].

2. Base teórica

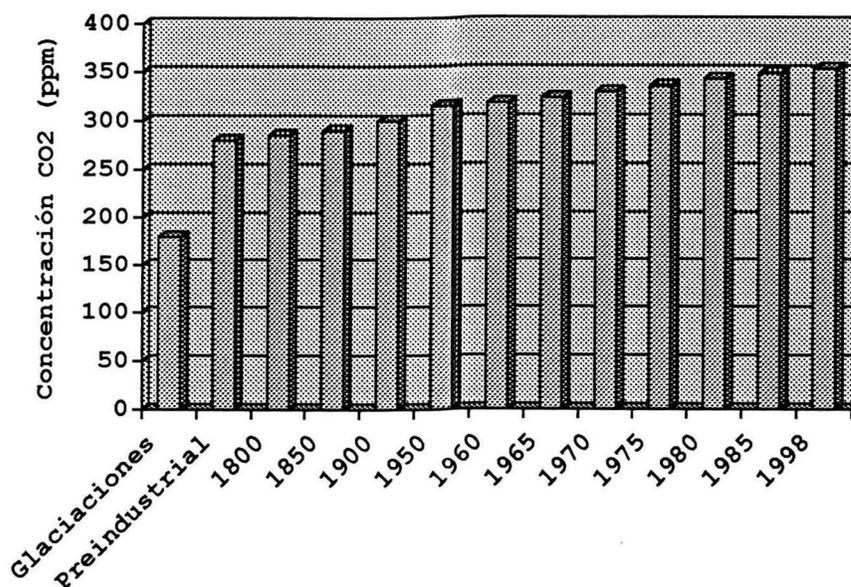
El dióxido de carbono

Es fundamental en el equilibrio gaseoso, una parte de él se preserva en la atmósfera, otra, en forma de carbonatos, va a dar a los océanos, donde los organismos marinos lo depositan en el fondo del mar y una tercera, tomada por los vegetales, es retenida en sus tejidos y parcialmente introducida al suelo donde se fosiliza. [UNEP y GEMS, 1 992], una pequeña fracción se agrega también por emisiones volcánicas [Parlamento Latinoamericano *et.al*, 1 998]. El CO₂ es el principal GEI, responsable de las dos terceras partes de volúmenes emitidos y calentamiento proporcional. [IPCC, 1 995]

Los bosques regulan el 70% del flujo de carbono entre la biosfera y atmósfera, [Schroeder, 1 993 cit. por López, 1 998], se explica esto por los altos contenidos de moléculas carbónicas en la xilomasa; la lignina y celulosa están conformadas en 48% de carbono, 2,2 t de madera son capaces de generar 1 t de carbono [FWPRDC, 1 996 cit por López, 1 998]. Como es obvio, su proporcionalidad se ha alterado, acumulándose más en la atmósfera [UNEP y GEMS, 1 992].

Se estima en 5,7 Gt el volumen de C emitido a la atmósfera cada año, consecuencia de la quema de combustibles fósiles y 2 Gt de la de bosques y desmante. Si los sumideros mayores, bosques y océanos, retienen alrededor de 4 Gt, la diferencia anual es de 3 Gt, que se acumula en la atmósfera. Es éste el límite? No, se estiman reservas del orden de 5 000 a 10 000 Gt, y 4 000 de ellas en carbón y petróleo. [Parlamento latinoamericano *et.al* 1 998]

Figura 3. Progresión de emisiones netas de CO2



Fuente: Elaborado en base a: Los gases que producen el efecto de invernadero (cambio climático global). [UNEP y GMS, 1 992] ; La lucha con tra el Cambio Climático: el compromiso del Parlamento Latinoamericano [Parlamento Latinoamericano et.al, 1 998]; Segunda Evaluación, Cmabio Climático 1 995. Informe del Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático [IPCC, 1 995].

Dado que el CO₂ atmosférico es un componente de permanencia larga, hasta un siglo y más, las predicciones sobre su incremento son diversas. Con respecto a los niveles preindustriales y para el siglo XXI: emisiones anuales entre 2 y 20 Gt año⁻¹; incrementos entre 23 y 116 veces; niveles de CO₂ atmosférico de 1,4 a 2 veces, y niveles de carbono atmosférico entre 367 y 531 ppmv. [IUCC, 1 995]

Se simulan algunas consecuencias, producto del aumento de CO₂ atmosférico: creciente demanda de fertilizantes sintéticos, por alza en la producción de biomasa vegetal; competencia con "malezas", que genéticamente superiores en la optimización de recursos, responderían mejor a las nuevas condiciones. Técnicos y políticos deberían adecuar, especies y técnicas de producción a nuevas ecozonas, con

consecuentes incrementos y decrementos productivos espaciales. [UNEP y GEMS, 1 992]

Prospectiva

Ya que los factores determinantes, son numerosos y complejos, es difícil emitir un pronóstico confiable de la afectación del clima planetario. Existen tres factores que así lo determinan: a) La complejidad de los sistemas, b) Retroacciones no-lineales y c) Sensibilidad creciente a factores climáticos y no-climáticos. [IPCC, 1 995]. De modo que las proposiciones que se emitan son de certeza relativa, no obstante sean respaldadas por argumentaciones científico-tecnológicas. [IPCC, 1 995, Parlamento latinoamericano et.al, 1 998]. El balance actual se resume en, que se siga emitiendo gases de efecto de invernadero en las proporciones presentes, equivale a retener 3 millones de toneladas de petróleo convertido por minuto, que es lo que nuestro planeta debería liberar al espacio para deshacerse del excedente energético y preservar su equilibrio. [IPCC, 1 995].

Algunas de los efectos modelados

Climáticos. Los GEI deberían causar una elevación media de la temperatura, entre 3,5 y 4,2 °C en este siglo, incrementándose con la latitud; variación en los regímenes de precipitación, períodos de lluvia y sequía más cortos e intensos por aceleración de los ciclos de evapotranspiración, incrementos de 7 a 11 %, más acentuados entre 30° LN y 30° LS, en consecuencia, mayores sequías en latitudes medias y altas; desplazamiento de las zonas climáticas y agrícolas hacia latitudes más australes y boreales, se ha estimado un ratio de variación entre 200 y

300 Km. C^{o-1}; retraimiento y derretimiento de polos y glaciares, elevándose con ello el nivel del mar, en el siglo XX se ha estimado en 0,15 m la elevación medio del nivel del mar, para el 2 030 se cree será 0,18 m y para el 2 100 0,65 m; decremento general de la nubosidad, más nubes bajas en altas latitudes y mas nubes altas en latitudes medias. [IPCC, 1 995; Woodweell, 1 996 cit. por Parlamento Latinoamericano, et.al 1 998]

Biofísicos. El calentamiento global implicaría alteraciones de los ciclos biogeoquímicos y pérdida de la biodiversidad [Vitousek, 1 994 cit. por López, 1 998], trayendo como consecuencias: superposición de hábitats, por Ej. Los bosques polares migrarían a extremos más nórdicos inclusive; nuevas configuraciones ecosistémicas; se añadiría un nuevo y sustancial ingrediente de selección, migración, extinción y padecimiento de especies; producción de flores, frutos y semillas en lapsos menores y diferentes períodos [Woodwell, 1 996 cit. por Parlamento Latinoamericano, et.al 1 998].

Socio-económicas. Como cualquier condición adecuaría su vigencia a las demás condiciones. Cambios en los esquemas de producción agrícola, amenaza de poblaciones habitantes de zonas costeras bajas e islas (1/3 de la población del planeta vive en los 60 Km. ribereños); desabastecimiento de alimentos (por incapacidad biológica y/o financiera para producirlos o adquirirlos), e inversamente, apertura de nichos de producción no considerados [Parlamento Latinoamericano, et.al 1 998]; las alteraciones en los procesos de demanda y satisfacción energética, afectarían grandes segmentos sociales y repercutirían en el comercio internacional, prosperidad económica, estilos de vida

individuales e inclusive habitabilidad. [IPCC, 1 995].

Algunos casos particulares

Agricultura. Modificación de patrones productivos y rendimientos, al incrementarse el CO₂ atmosférico (0,5 a 2% de aumento en biomasa por 10 ppmv de aumento de CO₂), los vegetales reducen su tasa de inspiración e incrementan su eficiencia en el uso del agua, incrementando su producción de biomasa, agravado esto por la cualidad fotosintética: plantas C3 y C4; sensibilidad a plagas por mayor turgencia foliar; demanda paulatina de nutrientes, acarreando riesgos de mineralización y agotamiento edáfico. [IPCC, 1 995].

Bosques y silvicultura. Cambios en la tipología de vegetación, velocidades de composición, crecimiento, reproducción y establecimiento de especies. Liberación de grandes volúmenes de CO₂ en períodos de transición de pérdida y establecimiento de ecosistemas; crisis en el suministro de madera, etc. [IPCC, 1 995; Woodwell, 1 996 cit. por Parlamento Latinoamericano, et.al 1 998].

Población. Hoy, por elevación del nivel del mar, mareas y crecidas cíclicas, 46 millones de personas corren riesgo por su vida, al elevarse el nivel medio del mar a 0,5 m, esta cifra subiría a 92 millones y a 1 m a 118 millones. El peligro es mayor, en deltas e islas pequeñas. Provocando nuevas oleadas de migración interna e internacional. [IPCC, 1 995].

Salud. Descenso de muertes por frío; alza de la mortalidad por enfermedades cardiorrespiratorias, oleadas de calor, más intensas y más largas (Haines, 1 996, cit. por

Parlamento Latinoamericano, *et.al* 1 998); mayor transmisión por vectores: paludismo (de 50 a 80 millones de casos más por año -sobre los 500 actuales-, fiebre amarilla; por desabastecimiento de servicios sanitarios, salmonelosis, cólera, etc. [IPCC, 1 995].

Tecnología. La eficacia para planificar y suministrar obras físicas: infraestructura de riego, sistemas de vigilancia, rehabilitación de embalses, cuencas, presas, apoyo a la migración, emergencia, vivienda, acondicionamiento de aire, azolve de presas, purificación de agua, etc. sería limitada por la escala de su demanda. [IPCC, 1 995].

Acuático. Mayor productividad biológica en latitudes tropicales y extinciones en ecuatoriales. Afectación de sistemas costeros, turismo, abastecimiento de agua potable, pesquería y biodiversidad. [IPCC, 1 995].

Ciclo hidrológico. Su intensificación focal, repercutiría en el corto plazo: disponibilidad de agua, intensidad de crecidas, escorrentía, sequías y en el mediano y largo plazo: inundaciones, erosión de suelos y desertificación. [IPCC, 1 995].

En América Latina, los mayores impactos se darán en los ecosistemas naturales de producción primaria, provisión de agua y biodiversidad. [Parlamento Latinoamericano, *et.al*, 1 998].

Que hacer?

Puesto en blanco y negro, son dos las medidas posibles para potenciar el secuestro de carbono: aumentar su retención o disminuir su emisión [López, 1 998]. Mas, todas estas pueden agruparse en 4 propuestas fundamentales:

1. Reducir el empleo de combustibles fósiles. En consecuencia las emisiones de GEI (que en la actualidad proveen el 80 % de la energía del planeta). Hasta hace poco, considerada la menos viable, pero con la crisis energética de los '80, se evidenció lo falaz de esta afirmación, a la vez la pobre eficiencia de su aprovechamiento. Se consideran así: a) Medidas de optimización, ahorro y recuperación energética y b) Empleo de fuentes de energía alternativas: solar, eólica, nuclear, mareas, etc. Estas proposiciones demandan plazos de adecuación, transición y aplicabilidad. En tanto, se sugiere el uso de combustibles fósiles menos pesados, como el metano y limitación activa de otros contaminantes, caso CFC's.

2. Filtros para los gases de efecto de invernadero. Propone filtrar, acumular y almacenar CO₂ y convertirlo en compuestos almacenables sin riesgo. Poco viable, por los elevados costos que significaría. En los estados Unidos este procedimiento elevaría el costo de la electricidad de 1,5 a 2 veces; tal vez más adelante sus posibilidades de implementación se incrementen.

3. Recuperación de GEI. La mayor parte de las propuestas se remiten a este ítem, la idea es que el carbono permanezca en la tierra y no en la atmósfera. Es una propuesta de aplicabilidad a mediano y largo plazo, se ha estimado que para igualar los niveles de CO₂ emitidos. Reforestación, debería reforestarse un área igual a la de Francia cada año, sumados los plazos de crecimiento, se necesitaría duplicar la vegetación de la tierra, lo que no es factible logísticamente. Secuestro oceánico, empleando el plancton como bombas biológica y convierta el CO₂ atmosférico en

carbonatos marinos, una fertilización a gran escala potenciaría este proceso; se cuestiona sus costos y colateralidad. Otra idea más tecnológica sugiere "enfriar la tierra" diseminando partículas que reflejen los rayos incidentes.

4. Adaptación al cambio. Dado lo progresivo del calentamiento, el hombre y sus actividades deberían modificarse paralela y gradualmente. Los sistemas de transferencia tecnológica resultarían claves, pero la respuesta diferencial, función de los recursos con que se cuenta para ello.

Objetivamente, las posibilidades se reducen a la reducción de emisiones e incremento de sumideros.

Prácticamente, su aplicabilidad es función del potencial tecnológico, económico y social (en ese orden), pero su determinación, de la capacidad política de decisión. Los escenarios contemplados: energía, industria, transporte, urbanismo, agricultura y silvicultura. [IPCC, 1 995].

Nuevamente resulta determinante la contradicción norte-sur, las restricciones de emisiones son uniformes?, los perjuicios y beneficios son asumidos equitativamente?, quienes se perjudican más de las restricciones?, quienes se beneficiarán más de las precipitaciones subsecuentes?

Finalmente, la posibilidad concreta de realización, depende de superación de vallas de formación, obstáculos culturales, institucionales, jurídicos, financieros y económicos.

(*) El caso de la agricultura y silvicultura. Se han sugerido algunas medidas tecnológicas para la mitigación:

disminución en volumen e intensidad del uso de combustibles, técnicas de labranza no disturbante (minimización de barbechos), rotación de praderas ganaderas, fertilización nitrogenada controlada, reconversión de deyecciones (compost, biogás, etc.), rotación con leguminosas y coberteras, eficiencia en el riego, instalación permanente de buffers (rompevientos, riberas de canales, bandas filtros), restauración y protección de tierras húmedas, conversión de tierras marginales a bosques y praderas, gestión (establecimiento y repoblamiento) de bosques, fomento e incorporación de prácticas agroforestales [IPCC, 1 995; USDA y NRCS, 2 000].

La interiorización. No se trata solamente de acciones concretas a hechos concretos -lo que ha caracterizado la actividad humana y su egocéntrico poder-, sino un cambio de actitud profundo, que facilite su convivencia armónica con los demás elementos componentes del ecosistema tierra. Igualmente es pertinente el sentido colaborativo que deberá tener la acción -contemplado por la Convención acerca del Cambio Climático-, considerando el alcance de las perspectivas de las decisiones políticas mundiales. [IUCC, 1 995].

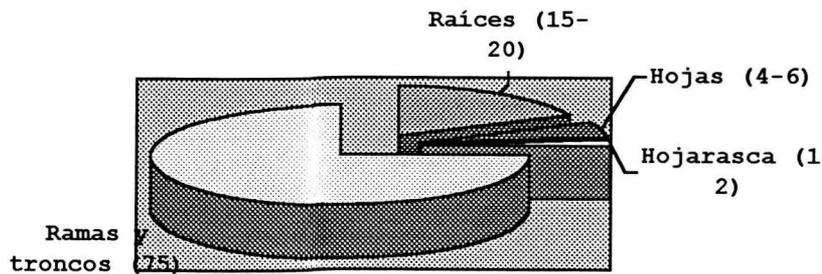
Biomasa y carbono

Definamos. Biomasa, volumen total de materia orgánica sobre la tierra, la escala de interpretación es arbitrara: árbol, hectárea, región, país, etc. Densidad de biomasa, el mismo concepto expresado por unidad de área (ha). El producto entre la densidad de la biomasa por la superficie, dará la biomasa total del espacio requerido [Brown, 1 997].

Productividad de biomasa, el mismo concepto por unidad de tiempo [Parde, 1 980 cit. por Barbaran, 2 000].

Consideremos sus componentes, (epígeos e hipógeos), árboles, arbustos, palmeras, arbolillos, lianas, epifitas, etc., y plantas muertas que oferten madera y mulch. Debe involucrar: hojas, ramas, troncos y corteza. En caso de bosques maduros, los volúmenes de biomasa no-arbórea, herbáceas, arbustos y lianas, no suelen superar el tres por ciento de la biomasa total [Jordan y Uhl, 1 978; Tanner, 1 980; Hegarty, 1 989; Lugo, 1 992. cit por Brown, 1 997], mientras que en bosques secundarios puede alcanzar hasta 30% [Brown y Lugo, 1 990; Lugo, 1 992]. Del 40 al 50% se incorpora al suelo, proveniente de hojas, ramas y raíces. [Regos, 1 989 cit. Por Barbaran, 1 998]

Figura 4. Distribución de la Biomasa forestal



Fuente: Ovington y Odum, 1 970 cit. por Determinación de biomasa y carbono en los principales sistemas de uso del suelo en la zona de Campo Verde. Barbarán G., J. 1 998.

Sin embargo, en la cuantificación de la biomasa se suelen subestimar algunas variables: las palmeras y las raíces, de aporte oscilante de acuerdo al clima y suelo pueden llegar hasta tercera parte [Brown y Lugo, 1 982; Stanford & Cuevas, 1 996; Regos, 1 989 cit. por Barbarán 1 998; Brown

1 997]. Lo que en conjunto, podría significar, el subestimar hasta en 50% del total [Brown, 1 997].

Entonces, el volumen de carbono orgánico preservado, debe ser función de la biomasa. Y este, como ya se vio, es enormemente oscilante. En promedio, una hectárea de bosque (todo tipo de bosque), debería generar 450 t ha⁻¹ de biomasa seca, con rangos entre 181 y 1 170 [Regos, 1 989 cit. Por Barbaran, 1 998], en el caso de los bosques tropicales americanos, de 209 a 481 t ha⁻¹ [Brown, 1 984 cit. por Barbaran, 1 989]. Al caso, interesa su distribución:

Cuadro 4. Biomasa por tipo de bosque

Ecossistema	Biomasa (t ha ⁻¹)
Bosques tropicales	60 - 800
Bosques caducifolios	60 - 600
Bosques boreales	60 - 400
Bosques templados	60 - 200

Fuente: Whittaker y Niering, 1 975 cit. por Determinación de biomasa y carbono en los principales sistema de uso del suelo en la zona de Campo Verde. Barbarán G., J. 1 998.

Dado un factor de proporcionalidad entre la biomasa forestal y su contenido de carbono, entre 0,45 y 0,5 [Barbaran, 1 998; IPCC, 1 996], su precisa estimación es fundamental. En consecuencia, los inventarios forestales son el punto de partida para estimación de carbono [Brown y Lugo, 1 992]. a) Midiendo directamente la biomasa y b) Deduciéndola por modelos alométricos; resultados de regresiones de grandes volúmenes de información en campo [Brown, 1 997].

Estudios subsecuentes ganan precisión asintótica para los modelos alométricos generados, [Segura, 1 999]. Sin embargo, la metodología aun carece de confiabilidad, árboles huecos, diámetro mínimo incierto, gravedad

especifica de la madera, etc. [Brown y Lugo, 1 992 cit por Segura, 1999]. Sugiriéndose entonces, el empleo de otras metodologías que ganen certeza, como las parcelas de muestreo permanente [Brown et.al, 1 989; Lugo, 1 992; Phillips, 1 998 cit. Por Segura, 1 999], muestreo destructivo [Araujo et.al 1 999, cit por Segura, 1 999].

3. La Agroforestería

La Agroforestería, como paradigma tecno-productivo, oferta ventajas comparativas en relación a algunos otros sistemas de uso de la tierra: elevación de réditos globales, producción y productividad biofísica, provisión de argumentos socioeconómicos que relieven su versatilidad circunstancial [Krishnamurthy y Avila, 1 999] y alternativa a los sistemas tradicionales de agricultura migratoria RTQ [ICRAF, 1 996, 1 998 cit. Por Alegre et.al, en prensa]. Se ha preconcebido el potencial de los SAF's para secuestrar carbono, sustentándolo en argumentos teóricos, dado su relativo mayor volumen de biomasa vs. monocultivos [Nair, 1 993; Krishnamurthy y Avila, 1 999]. Balance positivo entre el gas retenido y la biomasa convertida [USDA y NRCS, 2000]. Eficiencia en el secuestro y conversión del recurso forestal (biomasa verde, madera y suelo), mayor rentabilidad por ser los costos de manejo cero y aporte a la disminución de la presión de los bosques remanentes. [López, 1 998]. Mas la evidencia científica es aún escasa y la información dispersa [Schroeder, 1 994], como se verá:

En promedio, una hectárea de agroforestería puede secuestrar 95 tC, para alcanzar esto se necesitaría de 5 a 20 ha de SUT's monoculturales, ortodoxos. [Dixon 1 995 cit. por López, 1 998]. En conjunto, los suelos agrícolas son

capaces de acumular el 10% de las emisiones [Subak, 2 000]. Así, un sistema agrícola, capaz de sumir el 10% de las emisiones de CO₂, se distingue de uno agroforestal, por sus períodos y volúmenes de carbono ciclado, que en el último varían entre 10 y 50 t ha⁻¹ [Kursten y Burschel, 1 993 cit. por López 1 998]; de acuerdo al SAF que se trate, los extremos, inferior: linderos y cercos vivos aportarían de 3 a 25 t ha⁻¹, los intermedios, "taungya" y huertos caseros, hasta 50 t ha⁻¹, y más, los barbechos. Una purma de 15 años por ej. puede acumular hasta 100 t ha⁻¹ [Brown y Lugo, 1 990 cit. por López 1 998].

Cuadro 5. Volúmenes de carbono secuestrado por varios SUT's

Sistema de Uso de la Tierra	C secuestrado t ha ⁻¹
Bosque primario	300**
Bosque secundario (15 años)	159.88*
Bosque maderable	100 a 200**
Bosque primario intervenido	157.46*
Bosque recientemente quemada	96.52*
Terrenos en cambio de uso y rotación	-88 a 25**
Bosque secundario (3 años)	57.02**
Campo de plátano	50.14*
Sistemas agroforestales	25 a 30**
Rotaciones	-40 a 60**
Campo de maíz	45.18*
Plantación de árboles	11 a 61**
Campo de yuca	37.84*
Pastura	36.3*
Cultivos de barbecho corto (menos 5 años)	-5**
Pasturas y praderas	-3**

Fuente: Elaborado en base a, Determinación de biomasa y carbono en los principales sistemas de uso del suelo en la zona de Campo Verde [Barbarán, 1 998]* y ASB climate change working group report. Final report, phase 2 [Palm et.al, 1 999]**

Hay quienes sugieren un volumen medio de carbono secuestrado por los SAF's, igual a 95 t ha⁻¹. [Winjum, 1 992 cit. por López 1 998] entre otras posiciones.

La regeneración natural de bosques secundarios, se han sugerido como la mejor manera de almacenar carbono [Alfaro

Murillo, 1 997 cit. por López, 1 998], sería ésta, la manera más barata de manejar rodales, gestionando el crecimiento arbóreo y aprovechando transitoriamente los pastos residuales. En relación a ellos, los SAF's acumulan menor cantidad de CO₂ en la biomasa aérea, que esta sólo parcialmente arbolada, pero en el suelo se incrementa considerablemente. [López, 1 998].

De acuerdo a sus aptitudes, para implementar SAF's, las tierras se han categorizado en, a) tierras degradadas o improductivas b) tierras de aptitud agrícola y pastizales permanentes y c) tierras en barbecho corto [López, 1 998]

En función a su potencial para secuestrar carbono, las practicas agroforestales mas factibles resultarían: cortinas rompevientos, bosques buffer maduros, silvopasturas (adecuadamente manejada), cultivos leñosos de rotación corta (arbolillos para combustible y fibra) [USDA y NAC, 2 000]

Evaluemos la información bibliográfica que sustenta las hipótesis planteadas,

1. Los bosques tropicales retienen más carbono que otro ecosistema. Preservan más de la mitad de los bosques de regeneración, y sufren alrededor del 20% de la deforestación planetaria. [Trexler y Haugen, 1 995 cit. por López, 1 998]. Conservan 44 veces más biomasa que cualquier otro sistema, con incrementos de $0.62 \pm 0.37 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ [Houghton, 1 991 cit. por López; Phillips, 1 998 cit. por Segura, 1 999; Segura, 1 999]. Sus ratios de incremento anual varían de 1,1 a 2,1 t año^{-1} [Segura, 1 997], en consecuencia debe resaltarse la especial aptitud de la franja tropical, como sumidero de carbono atmosférico,

[Houghton, 1 997 cit. por Palm *et.al*, 1 999]; se afirma que el trópico amazónico mantiene en promedio 160 tC ha⁻¹ [Barbarán, 1 998]. Se cree la zona tropical almacena el 80% del carbono global, mientras que la templada el 17 y la boreal 3% [Trexler y Haugen, 1 995 cit. por López, 1 998].

2. **Fijan más carbono los bosques secundarios que los bosques primarios y/o maduros.** Los primarios han alcanzado su clímax y "congelado" su capacidad de conversión de carbono atmosférico a biomasa, mientras que los secundarios, intensifican los procesos de secuestro y liberación, por la aceleración y secuencialidad de sus ciclos [Ciesla, 1 995 cit. por López, 1 998; Ortíz *et.al* 1 998], un barbecho puede eventualmente recuperar de 50 a 80% la proporción de carbono de un bosque primario [Palm *et.al*, 1 999], de ahí el potencial de los barbechos, por la superficie que ocupan: 2570 millones de ha. [Lugo y Brown, 1 993 cit. por López, 1 998].

3. **Entre la tercera parte y la mitad del carbono retenido por un SUT tropical, se registra en el suelo.** [Schroeder, 1 994; Dixon *et.al*, 1 994 cit. por López, 1 998; Barbarán, 1 998].

Cuadro 6. Volumen de carbono por recipiente (tha⁻¹)

Fuente	Bosque	Pastura	Silvopastura
C vegetal	852	445	1 299
C del suelo	435	828	645
Total	1 287	1 297	1 942

Fuente: USDA y NAC, 2 000

Como parece evidente los bosques secundarios desarrollan más biomasa radicular que las plantaciones [Lugo, 1 992 cit. por López, 1 998].

Cuadro 7. Porcentaje relativo de Carbono almacenado, secuencia: antes RTQ, después RTQ e instalación de pastura, biomasa aérea, radicular y edáfica.

Fuente de Carbono	Antes RTQ (200 t/ha)	Después RTQ (105 t/ha)	Pastura 28 t/ha)
B. aérea	75%	45%	--
B. radicular	4%	7%	31%
Edáfica	16%	38%	69%

Fuente: Impacts of forest conversion: Estimates of carbon emissions and plant species loss in a Brazilian Amazon Colony [Fujisaka , 1 997]

A profundidades superiores a un metro, los suelos forestales contienen más carbono que biomasa aérea, el 15% de este carbono se recicla en períodos de varios años hasta décadas [Nepstad et.al, 1 994 cit. por López, 1 998]. Aún cuando se afirma que en los trópicos subhúmedos el potencial de secuestro de carbono es sobre el suelo y no en él. [Palm et.al, 1 999].

Cuadro 8. Porcentaje relativo de carbono en el suelo, entre 0 y 20 cm. Varios SUT's, en relación a un bosque primario no disturbado.

Sistema de Uso de la Tierra	Porcentaje
Barbechos largos	90 a 100
Sistemas Agroforestales	80 a 100
Pasturas	80
Barbechos cortos	65
Pasturas degradadas	50 ó menos

Fuente: Carbon Sequestration and Trace Emissions in Slash and Burn and alternative Land Uses in the Humid Tropics [Palm et.al, 1 999]

Una consideración anexa se refiere al carbono edáfico de origen orgánico, que se estimó equivale a tres veces el superficial, provisto por plantas y animales, dos veces el atmosférico y una tercera parte del de los combustibles fósiles [Gavenda, 2 000].

III. Materiales y Metodología

El sitio

Esta investigación se condujo entre agosto y noviembre del 2000, en el Perú, departamentos de Ucayali y Huánuco, provincias de Padre Abad y Tingo María y tres zonas: San Agustín, Previsto y Aguaytía.

Cuadro 9. Latitud y altitud media de las localidades del estudio

Localidad	Altitud media (msnm)	Coordenadas (Km)
San Agustín	1 600	412644X, 8982961Y
Previsto	600	418953X, 8995058Y
Aguaytía	400	444082X, 9001031Y

Fuente: Base de datos, Sistema de Información Geográfica, CIAT-Perú.

La franja estudiada involucra las tres ecozonas que emblematisan la amazonía peruana: a) Ceja de selva, sobre 1 000 m, lluvias superiores a los 4 000 mm año⁻¹ (San Agustín), b) Selva alta, entre 500 y 1 000 m y precipitaciones de 2 000 a 4 000 mm año⁻¹ (Previsto) y c) Selva baja, entre 0 y 500 m, generalmente llana e inundable (Aguaytía).

Ecoclimáticamente corresponden a: bosque húmedo tropical (BH-T), bosque húmedo premontano tropical (BH-PT) y bosque muy húmedo (BMH); con temperatura media anual de 26,6 °C, media máxima de 31,9 y media mínima de 21,6; elevada humedad atmosférica, entre 65,5 y 94,7% y media anual de 78,5%. [ONERN, 1 978; Baldoce, 1 993; Videoriente, 1 996].

Figura 5. Huánuco y Ucayali en el Perú y América Latina



Los tratamientos

En éstas tres ecozonas, nos desplazamos para detectar los SUT's de mayor relevancia económico-cultural y frecuencia relativa, que involucrara los SAF's deseados.

Reconocimos cinco prácticas agroforestales y un testigo parametrable:

1. Bosque primario, monte real, selva virgen (no intervenido, testigo). Idealmente no disturbada y reserva de especies autóctonas. Su evaluación es fundamental, pues nos da idea del volumen de carbono fijado por un bosque clímax.

2. Bosque secundario, "acahual" en México, "purma" en el Perú, definida como "vegetación leñosa de carácter sucesional y regeneración natural, en terrenos aprovechados por actividades humanas, de al menos 1 ha y 5 años desde el último cultivo" [CIFOR *et.al*, 1998]. Su capacidad de regeneración depende de la potencial de rehabilitación del suelo que lo albergue. Se consideran jóvenes a los tres a cinco años y viejos a los quince a veinte.

3. Café bajo sombra. Estructuralmente, sistemas que consideran como componente comercial al café y cultivo de sombra a alguna otra especie de mayor fuste, en la zona suele emplearse para este propósito especies locales, generalmente de aprovechamiento residual, combustible, terapéutico, etc. Fue requisito que el café estuviese en producción y no hubiera homogeneidad entre las parcelas muestreadas.

4. Silvopastura. Generalmente árboles dispersos en zonas de pastoreo. Instalados o residuales del establecimiento de especies de utilidad financiera (post-barbecho), pero en todo caso aprovechables, sombra, combustible, forraje, etc.

5. Pastura. Consolida la última fase de cambio de uso de los barbechos, ya instalado y en pleno aprovechamiento los suelos están sujetos a constante carga animal. Forraje empleado, generalmente especies mejoradas o asociaciones.

6. Huerto casero. De concepciones estructurales peculiares y definidas en función a las necesidades familiares. Debía ser aledaño a la residencia familiar y satisfacer en alguna medida sus necesidades alimenticias, terapéuticas, de combustible, forraje, etc. y circunstancialmente generar réditos financieros.

Subrayemos que todos estos SUT's se sustentan en el largo plazo en esquemas de agricultura migratoria, sin arreglos espaciales ni disposiciones temporales definidos (mas que la secuenciación RTQ tradicional).

Fundamento

En la ruta fotosintética el carbono es secuestrado en la biomasa y después parcialmente incorporado al suelo, así su cuantificación se hace en estos dos recipientes mayores, el muestreo de raíces para la cuantificación de carbono retenido se ha considerado [Fujisaka et.al, 1 997; Barbarán, 1 998], mas por resultar el método de muestreo deficiente y no significativo, de dejó de lado [Alegre, 1 998; Palm et.al, 1 999b].

Luego, su consolidación resulta de la sumatoria definida por:

$$CT = CB^* + CS \quad \text{donde,}$$

CT carbono total

CB carbono, biomasa

CS carbono, suelo

$$* CB = CAb + CAVHb + CH \quad \text{donde,}$$

CB carbono, biomasa

CAb carbono arbóreo

CAvHb carbono arbustivo y herbáceo

CH carbono, hojarasca

Medición en campo

La metodología para estimar carbono retenido, corresponde fundamentalmente a Woomer y Palm, 1 993 modificada por Palm y van Noordwijk, 1 999, guías desarrolladas por Tropical Soil Biology and Fertility Programme [Alegre *et.al*, en prensa] y documentos internos de Alternative Slash and Burning [Palm *et.al*, 1 999b].

1. Biomasa Arbórea

Arboles entre 2,5 y 30 cm de DAP. Se marcaron parcelas de 4 x 25 m en las que se midió la altura indirectamente usando un hipsómetro:

$$H = d (\text{tg } \alpha + \text{tg } \beta) \quad \text{donde,}$$

H altura

d distancia

α ángulo de elevación

β ángulo de depresión.

El diámetro a la altura del pecho (DAP), medido directamente, empleando cinta diamétrica. Por convención se realiza a 1,3 m, de los árboles vivos y parados muertos, si esta se bifurcase por debajo de 1,3 m, se consideraran dos árboles diferentes. Para árboles caídos muertos, se tomara un diámetro representativo (o dos) y su largo.

En caso existan árboles que superen los 30 cm de diámetro, se extrapolará la parcela inicial de 4 x 20 m a una de 5 x 100 m superpuesta a la primera, en ella se tomarán las mismas medidas.

Debe nominarse además en todos los casos: los nombres locales de cada árbol, si es ramificado (R) o no (NR), índice de densidad de la madera de la especie (alta: 0,8 media: 0,6 o baja: 0,4) y si es palmera (P) o liana (L).

2. Biomasa arbustiva y herbácea.

Se determinó al azar dos cuadrantes de 1 x 1 m, dentro de las subparcelas de 4 x 25 ó 5 x 100 m según se trate. En estas cortamos toda biomasa epígea fresca, procedente de arbustos, con menos de 2,5 cm de diámetro y hierbas. Obteniendo el peso fresco total (por metro cuadrado), y de éste, el peso fresco de una submuestra de valor arbitrario (aproximadamente 300 g), enviada a laboratorio para secado a 75 °C hasta alcanzar peso constante.

3. Biomasa seca (hojarasca)

Para cada parcela, dentro de los cuadrantes de 1 x 1 m,

tomamos subcuadrantes de 0,5 x 0,5 m, en ellos pesamos la hojarasca acumulada (por 0,25 m²), y de ésta, una submuestra de valor arbitrario, enviada a laboratorio para secado a 75 °C hasta alcanzar peso constante.

4. Muestreo de suelos y medición de densidad aparente

En los cuadrantes señalados para el muestreo de biomasa, se cavaron calicatas de 1 m de profundidad, definiendo en ellas los estratos: 0-0,1 m; 0,1-0,2 m; 0,2-0,4 m y 0,4-1,0 m. En cada uno, usando cilindros Uhland, se tomaron muestras para estimar la densidad aparente. Tomamos además muestras de en promedio 500 g, que se enviaron a laboratorio, para la cuantificación de carbono total y análisis complementario: textura, nitrógeno, pH, bases intercambiables y acidez, previo secado a 105 °C por 24 horas.

En suma se obtuvieron, 90 planillas de biomasa arbórea (alrededor de 2 400 accesiones), 180 muestras de biomasa fresca arbustiva-herbácea y 180 muestras de hojarasca, 720 muestras de suelo para determinación de carbono y análisis químico y 720 para densidad aparente.

Cálculos

1. Biomasa arbórea. Son varios los modelos diseñados para estimar los volúmenes de biomasa arbórea, todos indirectamente, por inferencia de sus principales medidas biométricas, generalmente altura, DAP, y densidad. [CIFOR *et.al*, 1 998].

1.1. En la estimación de biomasa de árboles vivos y muertos en pie -la mayor parte- y su cálculo de carbono retenido,

se sugieren el modelo de Palm, que se comenta la maximiza. [Brown, 1 997; Fujisaka *et.al*, 1 997; Barbarán, 1 998; Palm *et.al*, 1 999; Ceijas, 1 999; Palm, 2 000].

$$BA = 0,1184 \text{ DAP}^{2,53} \quad \text{donde,}$$

BA biomasa arboles vivos y muertos de pie
 0,1184 constante
 DAP diámetro a la altura del pecho
 2,53 constante

1.2. Para árboles muertos caídos consideramos, [Ceijas, 1 999; Palm, 2 000]

$$BAC = 0,4 \text{ DAP}^2 \text{ L } 0,25 \Pi \quad \text{donde,}$$

BAC biomasa árboles muertos caídos
 0,4 densidad (valor asumido por convención)
 DAP diámetro a la altura del pecho
 L largo del árbol
 0,25 constante
 Π pi, constante (3,1416)

2. Materia seca

De las muestras de campo (biomasa arbustiva y herbácea).

$$PST = (PFT/PSS)/PFS \quad \text{donde,}$$

PST peso seco total
 PFT peso fresco total
 PSS peso seco submuestra
 PFS peso fresco submuestra

3. Contenido de carbono, biomasa.

$$CC = B \cdot 0,45 \quad \text{donde,}$$

CC	contenido de carbono
B	biomasa vegetal
0,45	constante (proporción de carbono, asumido por convención)

4. Densidad aparente, suelo.

$$DA = PSN/VCH \quad \text{donde,}$$

DA	densidad aparente
PSN	peso seco neto
VCH	volumen cilindro Uhland (constante)

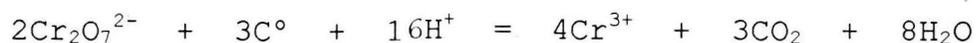
5. Volumen de suelo.

$$Vs = DA \cdot Ps \quad \text{donde,}$$

Vs	volumen de suelo
DA	densidad aparente
Ps	profundidad del suelo

Determinación de carbono orgánico en el suelo

Empleamos el Método de Nelson & Sommers. Oxidando las muestras de suelo con dicromato de cromo en presencia de ácido sulfúrico y calor y titulando luego con sulfato ferroso amoniacal. [Anderson e Ingram, 1 993].



Análisis estadístico

Realizamos un ANOVA para BCA (bloques completamente aleatorizados) y comparación de medias a través de la prueba de Tukey. Tales análisis se condujeron empleando FAUANL ver. 2.0 [Olivares, 1990]. El modelo empleado se ajusta a,

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \delta_j + \varepsilon_{ijk} \quad \text{donde,}$$

Y_{ijk} k-ésima unidad de muestreo de la j-ésima repetición del i-ésimo tratamiento

μ media

τ_i i-ésimo tratamiento

δ_j j-ésima repetición

ε_{ijk} error experimental en la k-ésima unidad de muestreo de la j-ésima repetición del i-ésimo tratamiento.

IV. Resultados

Carbono arbóreo

En los árboles en pie. El contenido de carbono en el bosque primario es estadísticamente superior al de los otros sistemas de uso de la tierra. Un segundo grupo, de transición, conformado por: huerto casero, bosque secundario, café bajo sombra y silvopastura, son iguales estadísticamente entre sí, aún con leves variaciones. Finalmente, el sistema de pastos presentó los niveles más bajos, pero igual en términos estadísticos al bosque secundario, café bajo sombra y silvopastura. Tukey al 95%, adelgaza la diferencia entre los segmentos bosque primario-huerto casero y huerto casero, bosque secundario, café bajo sombra, silvopastura y pastura; teniendo como enlace al huerto casero.

Cuadro 10. Comparación de medias del carbono en árboles en pie (t ha⁻¹)

Sistema de uso de la tierra	Carbono	
Bosque Primario	196,1	a [¶]
Huerto Casero	77,4	ab
Bosque Secundario	67,9	b
Café bajo sombra	45,4	b
Silvopastura	30,4	b
Pastura	2,28	b

¶ Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a $p < 0,05$.

Es claro y era predecible, que la densidad de árboles vivos en los bosques primarios debiera ser mayor a la de los restantes tratamientos. Sorprende que el huerto casero supere al bosque secundario en la densidad de árboles en pie, pero se justifica por la presencia de árboles cultivados de gran fuste y baja densidad, en relación a la

gran densidad y pobre fuste, característica de los bosques de regeneración (secundarios), pues se trata de bosques de ocho años en promedio. En los tres casos restantes, hay proporcionalidad entre la densidad arbórea y los volúmenes de carbono secuestrados por los mismos. Nótese el caso de la silvopastura, donde la inclusión de árboles basta para incrementar considerablemente la proporción de carbono retenido.

En árboles caídos muertos. Resultan dos grupos fundamentales, uno superior -estadísticamente- a los demás: bosque primario y los demás similares entre sí e inferiores al primero: café bajo sombra, bosque secundario, huerto casero, silvopastura y pastura.

Cuadro 11. Comparación de medias del carbono en árboles caídos ($t\ ha^{-1}$)

Sistema de uso de la tierra	Carbono	
Bosque Primario	167,0	a [¶]
Café bajo sombra	32,44	b
Bosque Secundario	13,8	b
Huerto Casero	6,25	b
Silvopastura	1,44	b
Pastura	0,0	b

¶ Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a $p < 0,05$.

En un bosque primario, la elevada presencia de árboles caídos muertos (más de la tercera parte) es consecuencia de la sucesión de los ciclos naturales y su densidad proporcional a la dinámica de regeneración del bosque, máxima en este caso. No debe descartarse algún grado de intervención, que pueda interpretarse como deforestación. En los demás tratamientos, el ordenamiento es función del diseño estructural del SAF y en cierta medida, el volumen de árboles caídos muertos predecible.

Que el tratamiento café bajo sombra supere al bosque secundario, lo que en teoría debiera invertirse, se interpreta por que en su dinámica temporal, correspondiente a la secuenciación RTQ, la plantación continúa a la roza y los restos de esta aún persisten, mientras que un bosque secundario, al consolidarse ha sufrido procesos de reforestación sucesiva por períodos mayores y la presencia de árboles caídos a consecuencia de ello, es simplemente menor.

Carbono arbustivo-herbáceo

Se reconocen dos estratos de semejanza estadística, el primero considera los tratamientos: pastura y silvopastura, y el segundo: silvopastura, bosque secundario, bosque primario, café bajo sombra y huerto casero. Estadísticamente resulta superior sólo la pastura en relación al bosque secundario, bosque primario, café bajo sombra y huerto casero, los demás casos: pastura vs. silvopastura y silvopastura vs. bosque secundario, bosque primario, café bajo sombra y huerto casero, la diferencia mínima significativa no basta para declararlos distintos.

Cuadro 12. Comparación de medias del carbono arbustivo-herbáceo (t ha⁻¹)

Sistema de uso de la tierra	Carbono	
Bosque Primario	1,28	a ³
Café bajo sombra	0,91	ab
Bosque Secundario	0,78	b
Huerto Casero	0,75	b
Silvopastura	0,63	b
Pastura	0,54	b

¶ Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a $p < 0,05$.

Era predecible la superioridad de los tratamientos pastura y silvopastura, por cualidades intrínsecas a su

composición, aún cuando esa capacidad para generar biomasa es antropogénica (pastos cultivados). Llama la atención, la considerable diferencia entre los sistemas pastura y silvopastura, casi del 40 %, atribuible en primera aproximación al componente arbóreo, pero que no la justifica plenamente. En los tratamientos siguientes: bosque secundario, bosque primario, café bajo sombra y huerto casero, el carbono aportado por la biomasa herbácea es menor, debido a la elevada densidad del dosel y mínima en los estratos inferiores, consecuencia del laboreo.

Carbono hojarasca

Los tres segmentos definidos, consideran tres grupos principales equivalentes entre sí. Primero, bosque primario y bosque secundario; segundo, bosque secundario y café bajo sombra; y tercero, café bajo sombra, huerto casero, pastura y silvopastura.

Cuadro 13. Comparación de medias del carbono en la hojarasca (t ha⁻¹)

Sistema de uso de la tierra	Carbono	
Bosque Primario	3,25	a [¶]
Bosque Secundario	2,57	ab
Café bajo sombra	1,70	bc
Huerto Casero	1,02	c
Pastura	0,69	c
Silvopastura	0,65	c

¶ Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a $p < 0,05$.

Se consideran superiores estadísticamente, a los del primer grupo a: bosque primario y bosque secundario, en relación a los del tercero c: café bajo sombra, huerto casero, pastura y silvopastura; mientras que los del segundo b: bosque secundario y café bajo sombra fungen de enlace entre uno y

otro. El orden de méritos, asigna una sucesión, función del grado de cobertura arbórea del SUT que se trate, pues como es evidente, la provisión de hojarasca es proporcional al aporte de biomasa foliar.

Carbono edáfico

No existe diferencia estadística significativa, a favor de ninguno de los tratamientos, o dicho de otra manera, todos los tratamientos resultan iguales estadísticamente.

Cuadro 14. Comparación de medias del carbono edáfico ($t\ ha^{-1}$)

Sistema de uso de la tierra	Carbono	
Café bajo sombra	113,54	a [¶]
Huerto Casero	110,51	a
Bosque Primario	98,78	a
Bosque Secundario	95,97	a
Pastura	93,01	a
Silvopastura	86,38	a

¶ Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a $p < 0,01$.

Es claro que la homogeneidad es provista por los aportes regulares de carbono edáfico. Recuérdese que en el muestreo de suelos se consideró un prisma de un metro de profundidad, generando un volumen hipotético de $10\ 000\ m^3$, entonces la diferencia (no estadística) a favor de café bajo sombra y huerto casero, podría ser consecuencia del laboreo; nótese además, que el aporte de las deyecciones del ganado, casos de pastura y silvopastura, no afecta significativamente el stock de carbono edáfico.

Carbono total

Considera la sumatoria de los ítems anteriores. Resulta claro, que el tratamiento bosque primario es

estadísticamente superior a los demás: huerto casero, café bajo sombra, bosque secundario, silvopastura y pastura, en su aptitud para fijar carbono. Comparaciones entre todos los demás tratamientos resultan insuficientes para declararlos distintos.

Cuadro 15. Comparación de medias del carbono total (t ha⁻¹)

Sistema de uso de la tierra	Carbono	
Bosque Primario	465,84	a [¶]
Huerto Casero	195,73	b
Café bajo sombra	193,69	b
Bosque Secundario	180,99	b
Silvopastura	119,75	b
Pastura	97,26	b

¶ Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a $p < 0,01$.

Es evidente que el aporte que equilibra todos los tratamientos apreciados, corresponde al edáfico (cuadro anterior). No obstante ello, sus valores y diferencias son considerables a favor del bosque primario y en desmedro de la silvopastura y pastura, especialmente en este último caso. También es de subrayar el perjuicio del tratamiento bosque secundario, que desciende al cuarto lugar -a pesar de no alterar la interpretación por ser estadísticamente iguales-, mas debe explicarse por la alta y regular contribución edáfica.

Carbono gestionable^a

Para el análisis de varianza y todas las pruebas de comparación de medias realizadas, el tratamiento bosque

^a Asumiendo que solo es factible administrar en el carbono epigeo: arbóreo, arbustivo y herbáceo (al menos en el corto plazo); escindiendo de él al edáfico, que en consolidado, por su baja dispersión resulta altamente distorsionante. Así consideramos importante, detallar las proporciones en las que se preserva, e inferir de ello nuestras posibilidades de intervención.

primario es estadísticamente superior a los demás: huerto casero, bosque secundario, café bajo sombra, silvopastura y pastura.

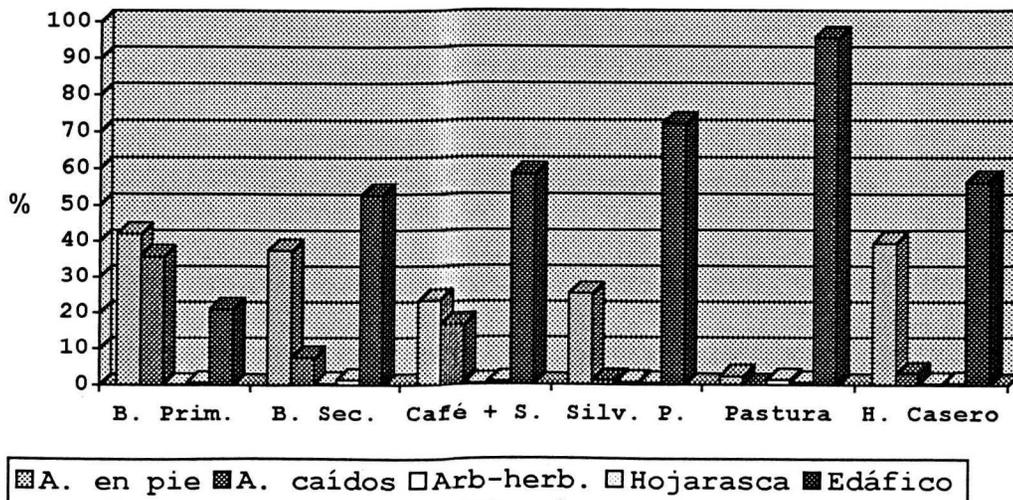
Cuadro 16. Comparación de medias del carbono gestionable (t ha⁻¹)

Sistema de uso de la tierra	Carbono	
Bosque Primario	367,07	a [¶]
Huerto Casero	85,23	b
Bosque Secundario	85,01	b
Café bajo sombra	80,16	b
Silvopastura	33,37	b
Pastura	4,25	b

¶ Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a $p < 0,01$.

Se restaura el ordenamiento apreciado en carbono arbóreo, el más predecible: bosque primario, huerto casero, bosque secundario, café bajo sombra, silvopastura y pastura. Si bien no existe diferencia estadística, los tratamientos huerto casero, bosque secundario y café bajo sombra, cuantitativamente conforman un subgrupo de aportes muy regulares, y finalmente la silvopastura y pastura, con menores participaciones, especialmente la última.

Figura 6. Carbono por SUT y fuente

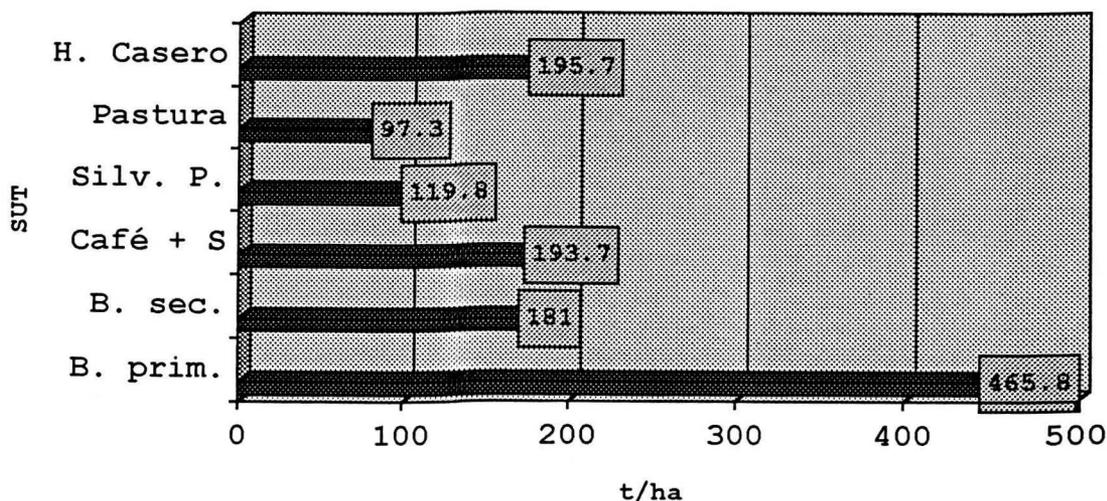


Carbono fragmentado

En el caso del bosque primario, el mayor volumen de carbono retenido se encuentra en la biomasa arbórea, sorprendentemente alta en árboles caídos muertos y en menor proporción en el suelo, consecuencia de la alta cuota de carbono arbóreo. Los aportes de carbono en fuentes de biomasa no arbórea (arbustiva, herbácea, hojarasca y edáfica), en suma no alcanzan la cuarta parte del volumen global.

Para el bosque secundario, el mayor aporte -al igual que en los demás sistemas- corresponde al carbono edáfico, en un porcentaje ligeramente superior al 50%, lo que debería ratificar la hipótesis complementaria 2. la proporción de árboles caídos, considerablemente baja en relación a la del testigo y café bajo sombra, se explica en su dinámica de regeneración (explicado en un ítem anterior).

Figura 7. Carbono total por SUT



En el Café bajo sombra, el carbono edáfico es considerablemente superior en el rango medio, el de árboles

caídos muertos relativamente alto por el asunto de la dinámica RTQ y la de árboles en pie, sorprendentemente menor en comparación a la de la silvopastura, no a causa de la densidad espacial sino más bien de la edad del sistema, que suele preservar individuos mayores y consecuentemente más robustos.

Para la silvopastura, una proporción de carbono es edáfico es altísima, casi 3/4 partes, en comparación a la cuarta parte de árboles en pie y más considerando que la presencia de árboles caídos muertos es bajísima y el aporte dado por herbáceas y arbustivas mínimo en contraste con el gran total.

Pastura. Casi el 96% del carbono es contribuido por el suelo, le siguen, árboles en pie, que en teoría debería ser nulo, tratándose de un sistema de uso de la tierra pastoril, pero que circunstancialmente toma vigencia por relictos, cercas vivas, árboles fuente de subproductos excepcionales, etc. La proporción superior, vs. los demás tratamientos, en aporte de carbono herbáceo y hojarasca no arbórea, se debe a la concepción del sistema.

En el tratamiento Huerto casero, además del suelo, los árboles en pie son la principal fuente de carbono, estos corresponden a plantaciones aprovechables, generalmente perennes, los árboles caídos muertos en baja proporción y los aportes herbáceos (fresco y seco) son mínimos y promediales.

Carbono por localidades

No existe diferencia estadística significativa entre los volúmenes de carbono retenidos en cada localidad. La

hipótesis inicial que concebía variaciones en las proporciones de acumulación consecuencia de las condiciones ambientales/piso ecológico quedan pues invalidadas.

Cuadro 17. Comparación de medias del carbono por localidades (t ha⁻¹)

Localidad	Carbono	
Previsto	268,92	a [¶]
San Agustín	192,49	a
Aguaytía	165,22	a

¶ Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a $p < 0,05$.

V. Discusión

Premisas,

Dentro de los SUT's estudiados, consideramos los SAF's: café bajo sombra, silvopastura (árboles en pastizales), huerto casero y bosque secundario, los que de acuerdo a su composición y estructura corresponden a: agrisilvícola zonal, silvopastoril mixto, agrisilvícola mixto-espacial y agrisilvícola rotacional correspondientemente. Los otros dos sistemas, bosque primario y pastura, son extremos y sirven de parámetros en el análisis.

Si enfocamos la gestión intensiva del sistema, como premisa para el análisis, deberemos concentrarnos en los SAF's: café bajo sombra, silvopastura y huerto casero, dado que los bosques de regeneración son secuenciales y de períodos de gestión prolongados; luego, su administración técnica involucra otras consideraciones (barbechos mejorados).

Se discuten las hipótesis propuestas:

Hipótesis fundamental. Los SAF's secuestran un mayor volumen de carbono en relación a los SUT's ortodoxo-locales.

Esto se demostró relativamente, nos planteamos algunas consideraciones al respecto,

El SAF huerto casero, pese a alcanzar tasas considerablemente elevadas de carbono secuestrado, debe tenerse en cuenta: a) no es una alternativa masiva y b) no puede objetivar el secuestro de carbono como uno de sus fines principal, sino accesorios. Esto por la lógica que

los motiva: pequeñas parcelas familiares, satisfactoras de necesidades inmediatas y ocasionalmente, generadoras de réditos complementarios. En virtud a ello, no es factible una decisión política que los involucre.

Conceptualmente, el sistema más cercano a la definición formal de la Agroforestería en su aptitud extensiva, es el café+sombra. Así puede compararse y sugerirse como alternativa a sistemas monoculturales extensivos que obvian la presencia del componente leñoso. Oferta una posibilidad importante: 80,16 tC ha⁻¹ de fuentes gestionables, casi el 40% del carbono aportado, proviene de los árboles y logra el mayor volumen de carbono edáfico 113,54 tC ha⁻¹, a lo que probablemente contribuye el laboreo.

La conversión de terrenos destinados a pastoreo en silvopasturas, por incorporación de árboles a baja densidad (SAF árboles en pastizales), incrementa en más de ocho veces su potencial para retener carbono, trayendo además múltiples beneficios consecuentes y casi ningún costo anexo. Bajo este criterio, son considerables también, el empleo de variantes tecnológicas agroforestales, que podrían adjuntarse y no afectarían las cualidades del SUT que se trate: cercas vivas, árboles en curvas de contorno, cortinas rompevientos, etc.

Recalcamos algunos comentarios, que debe ser fundamentales en lo sucesivo, a) el volumen de carbono secuestrado por el suelo es muy elevado, b) es constante, no función directa de la biomasa que hospeda y c) probablemente sí de la actividad humana, laboreo. Precedentemente, se ha muestreado suelos a profundidades menores y en consecuencia estimado prismas menores también, con intención de

cuantificación de volumen radicular [Fujisaka, 1 997], sin embargo, es claro que el "carbono voluble" corresponde casi exclusivamente al vegetal, pues los mecanismos de liberación de carbono edáfico son más complejos. Así, la gestión de la vegetación persiste como opción antropógena de mitigación a emisión de CO₂ o su secuestro.

Hipótesis complementaria 1: Los bosques tropicales retienen más carbono que cualquier otro ecosistema.

Los resultados obtenidos lo corroboran ampliamente, veamos:

En seis de los siete, grupos de análisis sometidos, para determinar la capacidad de acumulación de fitomasa y consecuentemente de carbono, el tratamiento bosque primario (virgen, no intervenido, floresta natural, etc.) se ubica en el primer grupo de significancia estadística.

Argumentando, la mayor densidad arbórea justifica los dos primeros factores: biomasa arbórea, viva y muerta, y hojarasca; y probablemente también al último: edáfico, por incorporación de materiales orgánicos en descomposición, además del laboreo.

En el caso de la biomasa arbustiva-herbácea, su aporte es superado (cuantitativa, mas no estadísticamente) por el SUT pastura y el SAF silvopastura, por que en estos, la gestión de producción, se concentra en este estrato.

Hipótesis complementaria 2: De acuerdo a su dinámica espacio-temporal, fijan más carbono los bosques secundarios que los bosques primarios y/o maduros"

Con la información recabada y análisis realizados, esto no puede afirmarse concluyentemente. Debido a las divergencias

entre las tasas y tiempos de acumulación por sistema.

Presumiendo que los ciclos de rotación de cada sistema, sean considerados como períodos de aporte cíclico, las veces que fuese contenido en uno mayor, caso bosque primario, sería el ratio que los comparase (tasa de acumulación de carbono). Ej. Si un ciclo de barbecho dura 15 años y la edad del bosque testigo es 60, el sistema RTQ sería tanto o más eficiente que el testigo, en cuanto acumule la cuarta parte o más, por cada ciclo de quince años, esta apreciación es clave y debería extrapolarse a los análisis entre SAF's y SUT's alternativos.

Consideremos la anterior afirmación apriorística; el índice existe, pero las apreciaciones que alcanza son de validez relativa, los sistemas vivos son dinámicos, casuísticos y hasta caóticos, entonces su desempeño se sujeta a numerosos factores capaces de afectarlos y circunstancias temporales. Las evaluaciones realizadas son estáticas, los bosques maduros pueden o no haber alcanzado su clímax, no se han determinado con exactitud sus edades, no se ha contemplado la dinámica de acumulación de cada sistema, etc.

Pese a todo ello veamos, el testigo supera en más de cuatro veces, la capacidad de acumulación de carbono gestionable, en comparación a los sistemas agrisilvícolas y 10 con relación al silvopastoril. Si estipulamos las edades de los SAF's analizados entre seis y doce -en el caso del huerto casero puede extenderse más, pero considerando su carácter no extensivo no se toma en cuenta-, serían opciones atractivas, pues en lapsos relativamente breves, de 40 a 60 años, igualarían e inclusive superarían las cuotas del testigo mayor.

La gestión de bosques de regeneración es fundamental, por tratarse de los sistemas más difundidos [Schroeder, 1994] y de mayor capacidad de secuestro y ciclaje. Con una edad media de ocho años y secuestro de en promedio 85,01 t C gestionable ha⁻¹. Su enriquecimiento y gestión adecuada, caso de los barbechos mejorados específicamente, podría significar un considerable aporte a la dinámica de secuestro de carbono en SUT's tropicales en general y SAF's en particular.

El SAF café+sombra -que secuestra 80,16 t C gestionable ha⁻¹ solo superado en términos estadísticos por el bosque primario-, de aprovechamiento comercial, gran versatilidad, posibilidades extensivas y ciclos de regeneración cortos, propone las posibilidades de los SAF's agrisilvícolas zonales. Que otorgan las mayores posibilidades de conversión de monocultivos a gran escala, y por ello de mayor factibilidad en la gestión política.

Hipótesis complementaria 3: Entre la tercera parte y la mitad del carbono retenido por un SUT tropical (inclúyase bosques), se registra en el suelo.

La investigación llevada, no deja dudas al respecto.

En todos los sistemas (a excepción del bosque primario), la proporción de carbono edáfico supera el 50% de la contribución global, en el caso de la silvopastura el 72,1% y 95,6 para la pastura.

Si las proporciones de carbono edáfico, pueden diluirse por los restantes aportes, su evaluación cuantitativa deja poco margen de duda, con una media aritmética de 99,69 t C ha⁻¹ y una desviación estándar de 29,38 t C ha⁻¹ resulta claro que

se trata de valores de alta estabilidad y baja dispersión.

Adicionalmente,

Los SAF's pueden contribuir indirectamente a la disminución de la concentración atmosférica de CO₂ y como alternativa al cambio de uso de la tierra vs. los procesos RTQ tradicionales. Ahora la decisión resulta ser fundamentalmente política.

Quedan abiertas otras posibilidades de estudios subsidiarios, que consideren: el monitoreo de la evolución de los SAF's para secuestrar carbono, generación de modelos de cuantificación locales, el rastreo de la ruta del carbono orgánico edáfico, participación del carbono inorgánico, la valoración financiera de la conversión de SUT's a sumideros (acuerdos de negociación de emisiones), etc.

VI. Conclusiones

1. Los volúmenes de carbono secuestrado por los sistemas de uso de la tierra estudiados, incluyen la sumatoria de los componentes: arbóreo, arbustivo-herbáceo y de hojarasca (biomasa), y edáfico. Los que fueron de: 465,84 tha^{-1} para bosque primario, 195,73 tha^{-1} para huerto casero, 193,69 tha^{-1} para café bajo sombra, 180,99 tha^{-1} para bosque secundario, 119,75 tha^{-1} para silvopastura y 97,26 tha^{-1} para pastura.
2. Los aportes por componente y sistema varían ostensiblemente, pero queda claro que los principales contribuyentes son los árboles y el suelo.
 - 2.1. El rango de acumulación de carbono en la biomasa arbórea, fluctuó desde 2,4% para la pastura a 78% para el bosque primario. Los valores intermedios fueron: 45% para bosque secundario, 42% para huerto casero, 40% para café bajo sombra y 27% para silvopastura.
 - 2.2. La contribución de carbono por la biomasa arbustiva-herbácea, fluctuó entre 0,16% en el bosque primario hasta 1,32% en la pastura. La hojarasca siguió esta misma tendencia, como fuere el aporte de ambos componentes es mínimo con respecto al consolidado global.
 - 2.3. Las proporciones de carbono edáfico, son inversamente proporcionales a las del arbóreo, varían de 21,21% en el bosque primario con participación máxima de árboles al 95,59% para la

pastura; la silvopastura lo tiene en 72,1% y los sistemas agrisilvícolas en 53,02, 58,62 y 56,47%, para bosque secundario, café bajo sombra y huerto casero respectivamente.

VII. Literatura citada

Alegre, J., A., Ricse, C. Palm. 1 998. Informe de discusiones Proyecto ASB-Carbono en sistemas de uso de la tierra; documento de circulación interna. Yurimaguas, Loreto, Perú. 2 p.

Alegre, J., L. Arévalo y A. Ricse. En prensa. Comunicación personal. Reservas de carbono y emisión de gases con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la amazonía peruana. Taller Internacional de Sistemas Agroforestales CORPOICA, 31 de julio a 3 de agosto. Santa Fe de Bogota, Colombia. 15 p.

Anderson, J.M., and J.S.I. Ingram. 1 993. Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods. CAB International. Wallingford, Oxon, England.

Baldoceda A., R. 1 993. Diagramas bioclimáticos de la zona de Pucallpa y Atalaya. Universidad Nacional de Ucayali, Facultad de Ciencias Forestales, Departamento Académico de Conservación y Medio Ambiente. Pucallpa, Perú. 21 p.

Barbarán G., J. 1 998. Determinación de biomasa y carbono en los principales sistemas de uso del suelo en la zona de Campo Verde. Tesis profesional. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Ucayali. Pucallpa, Ucayali, Perú. 54 p.

Brown, S. 1 997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. FAO Forestry paper, 134. Food and Agriculture Organization. Caracalla, Rome, Italy. Pp: 1-18.

Ceijas T., E. 1 999. Almacenamiento de carbono en bosques tropicales secundarios de la zona de Alexander Von Humboldt-Pucallpa. Proyecto de tesis, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Ucayali. Pucallpa, Ucayali, Perú. pp: 4-15.

CIFOR, CATIE, BID, EMBRAPA, UCA. 1 998. Protocolo de Levantamiento de vegetación en bosques secundarios. Proyecto de investigación, Manejo de bosques secundarios en América Tropical. 16 p.

CMNUCO. 1 997. Tercera sesión de la conferencia de las Partes, Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático - Kyoto '97. Carpeta de Prensa. Oficina de Información sobre las Convenciones del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente para la Secretaría del Cambio Climático. Ginebra, Suiza. 17 p.

Fujisaka, S., C. Castilla, G. Escobar, V. Rodrigues, E. Veneklaas, R. Thomas, M. Fisher. 1 997. Impacts of forest conversion: Estimates of carbon emissions and plant species loss in a Brazilian Amazon colony. Centro Internacional de Agricultura Tropical, International Centre for Research in Agroforestry, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria. 22 p.

Gavenda, B. 2000. Soils and Carbon Sequestration. En The Overstory # 66. Carbon Sequestration: Storing Carbon in Soils and Vegetation <<http://www.agroforester.com/overstory/overstory66.html>>. 4 p.

IPCC. 1 995. Segunda evaluación, Cambio Climático 1 995. Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Organización Mundial de Meteorología. 71 p.

IUCC, PNUMA. 1 995. Para comprender el cambio climático: guía elemental de la Convención Marco de las Naciones Unidas. Oficina de Información sobre el Cambio Climático. Oficina Suiza del Medio Ambiente de Bosques y Paisajes. Chatelaine, Suiza. 20 p.

Krishnamurthy, L. y M. Avila. 1 999. Agroforestería Básica. Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. México D.F., México. pp: 29-36.

López M., A. 1 998. Aporte de los sistemas silvopastoriles al secuestro de carbono en el suelo. Tesis de Maestría. Escuela de posgrado, Programa de Enseñanza para el Desarrollo y la Conservación, CATIE. Turrialba, Costa Rica. pp: 3-15.

Nair, P.K.R. 1 997. Agroforestería. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 543 p.

ONERN. 1 978. Inventario, evaluación e integración de los recursos naturales de la zona Pucallpa-Abujao. República del Perú, Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales. Lima, Perú. pp: 35-55.

Ortiz, R., O. Ramírez, B. Finegan. 1 998. CO₂ Mitigation service of Costa Rican secondary forests as economic alternative for joint implementation initiatives. En Ecology and management of tropical secondary forest science, people and policy. CATIE, CIFOR. Turrialba, Costa Rica. pp: 213-227.

Palm C.A., K. Hariah y M. van Noordwijk. Junio 1 999. Muestreo revisado de carbono para ASB. Mimeografiado. Documento de trabajo. 7 p.

Palm, C.A., L. Arévalo. Sept 9. 2 000. Comunicación electrónica. Carbon Stock Pucallpa. 1 p.

Palm, C.A., M. van Noordwijk, J. Alegre, L. Arévalo. Oct. 28. 2 000. Comunicación electrónica. Carbon Calculations. 1 p.

Palm, C.A., P.L. Woomer, J. Alegre, L. Arévalo, C. Castilla, D.G. Cordeiro, B. Feigl, K. Hairiah, J. Kotto-Same, A. Mendes, A. Moukam, D. Murdiyarso, R. Njomganag, W.J. Parton, A. Ricse, V. Rodrigues, S.M. Sitompul, and M. van Noordwijk. 1 999. Carbon Sequestration and Trace Emissions in Slash and Burn and alternative Land Uses in the Humid Tropics. ASB Climate Change working group report, Final report, Phase 2. 27 p.

Parlamento Latinoamericano, Ciudadanía Ambiental Global, ALDA. 1 998. La lucha contra el Cambio Climático: el compromiso del Parlamento Latinoamericano; Primer taller del Parlamento Latinoamericano sobre el Cambio Climático. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Buenos Aires, Argentina. 174 p.

Schroeder, P. 1 994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 27. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. pp: 89-97.

Segura M., M. 1 997. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costaricensis*, en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis profesional. Universidad Nacional, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, Escuela de Ciencias Ambientales. Heredia, Costa Rica. 125 p.

Segura M., M. 1 999. Valoración del servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados del Area de conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis de Maestría. Escuela de Posgrado, Programa de Enseñanza para el Desarrollo y la Conservación, CATIE. Turrialba, Costa Rica. pp: 1-23.

Subak, S. 2 000. Agricultural Soil Carbon Accumulation in North America, Considerations for Climate Policy. Natural Resources Defense Council. USA. 19 p.

UNEP, EU, SIDS. 1 999. Caribbean Environment Outlook. United Nations Environment Programme, European Community, Small Island Developing States. Anagram Editorial Service. Guilford, United Kingdom. 74 p.

UNEP, GEMS. 1 992. Los gases que producen el efecto de invernadero (cambio climático global). Sánchez-Vélez A. y Gerón D., X. Traductores. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 41 p.

UNEP. 1 996. Final Report of the Citizen Forum on Regional Environmental Management. United Nations Environment Programme, Regional Office for Latin America and the Caribbean. Buenos Aires, Argentina. pp 15-33.

USDA-NAC. Marzo 2 000. Working Trees for Carbon Cycle Balance. Agroforestry: Using trees and shrubs to produce social, economic, and conservation benefits. United States Department of Agriculture, National Agroforestry Center. UNL, Lincoln, USA. 3 p.

USDA-NRCS. 2 000. Growing Carbon, A New Crop That Helps Agricultural Producers and the Climate Too. United States Department of Agriculture, National Agroforestry Center, Environmental Defense, Soil and Water Conservation. USA. 7 p.

Videoriente. 1 996. Gran Enciclopedia de la Región Ucayali. Videoriente Editores. Lima, Perú. pp: 17-24.

Woomer, P.L. and C.A. Palm. 1 993. Shifting Cultivation Effects on Tropical Soil Organic Matter. Experimental Protocol prepared for the Global Initiative for Alternatives to Slash and Burn Agriculture. Tropical Soil Biology and Fertility Programme. Nairobi, Kenya. Mimeografiado 35 p.

WRI. Marzo 2 000. Climate Change; Forest and land-use change carbon sequestration projects. World Resources Institute. Washington DC., USA. 5 p.

WRM. Octubre 1 998. Boletín electrónico # 16. World Rainforest Movement. <<http://www.wrm.org.uy>>

BIOMASA - ARBUSTOS ($\theta < 2,5$ cm) Y HERBÁCEAS

N°	Peso fresco total (g/m ²)	Peso fresco submuestra (g)
1		
2		

BIOMASA - HOJARASCA

N°	Peso fresco total (g/0,25 m ²)	Peso fresco submuestra (g)
1		
2		

SUELO

	Peso de muestras de 105 cm ³ (g)	
	1	2
Estrato		
0-10cm		
10-20cm		
20-40cm		
40cm-1m		

Apéndice 2. Análisis de Varianza por recipiente y localidades

2.1. ANAVA Carbono en árboles en pie.

FV	GL	SC	CM	F	P>F
Tratamientos	5	68143,343750	13,668945	7,8877	0,003
Bloques	2	2403,851563	1201,925781	0,6956	0,525
Error	10	17278,351563	1727,835205		
Total	17	87825,546875			

CV = 59,467%

2.2. ANAVA Carbono en árboles caídos.

FV	GL	SC	CM	F	P>F
Tratamientos	5	63116,898438	12623,379883	5,7915	0,009
Bloques	2	7208,486328	3604,243164	1,6536	0,239
Error	10	21796,287109	2179,628662		
Total	17	92121,671875			

CV = 126,808%

2.3. ANAVA Carbono arbustivo-herbáceo.

FV	GL	SC	CM	F	P>F
Tratamientos	5	1,011962	0,202392	7,2614	0,005
Bloques	2	0,451745	0,225873	8,1039	0,008
Error	10	0,278722	0,027872		
Total	17	1,742429			

CV = 20,457%

2.4. ANAVA Carbono hojarasca.

FV	GL	SC	CM	F	P>F
Tratamientos	5	17,289711	3,457942	13,1409	0,001
Bloques	2	2,128899	1,064449	4,0451	0,051
Error	10	2,631439	0,263144		
Total	17	22,050049			

CV = 31,121%

2.5. ANAVA Carbono edáfico.

FV	GL	SC	CM	F	P>F
Tratamientos	5	1635,75	327,149994	0,3701	0,858
Bloques	2	4192,421875	2096,210938	2,3711	0,143
Error	10	8840,578125	884,0578		
Total	17	16668,75			

CV = 29,821%

2.6. ANAVA Carbono total.

FV	GL	SC	CM	F	P>F
Tratamientos	5	262913,3125	52582,664063	10,1106	0,002
Bloques	2	34687,3125	17343,65625	3,3348	0,077
Error	10	52007,4375	5200,743652		
Total	17	349608,0625			

CV = 34,527%

2.7. ANAVA Carbono gestionable.

FV	GL	SC	CM	F	P>F
Tratamientos	5	255826,42188	51165,285156	10,0303	0,002
Bloques	2	15092,4375	7546,21875	1,4793	0,273
Error	10	51010,875	5101,087402		
Total	17	321929,73438			

CV = 65,428%

2.8. ANAVA Carbono por localidades.

FV	GL	SC	CM	F	P>F
Tratamientos	2	28898,3125	14449,15625	3,0242	0,105
Bloques	4	25978,4375	6494,609375	1,3593	0,329
Error	8	38223,0	4777,875		
Total	14	93099,75			

CV = 33,092%

Apéndice 3. Carbono secuestrado por localidades y tratamientos (t ha⁻¹)

Localidad	SUT	Arb en pie	Arb. Caídos	Arbustivo-herbáceo	Hojarasca	Edáfico	Total
San Agustín	Bosque primario	253,6	109,9	0.88	3.88	55.1	423.4
San Agustín	Bosque secundario	55,5	4,8	1.06	2.68	93.2	157.3
San Agustín	Café bajo sombra	28,9	22,3	0.49	1.77	102.9	156.4
San Agustín	Silvopastura	17,2	0,2	0.92	0.66	67.9	86.9
San Agustín	Pastura	6,9	0,0	1.05	0.14	102.8	110.8
San Agustín	Huerto casero	97,0	0,0	0.61	0.54	122.0	220.1
Previsto	Bosque primario	240,7	297,4	0.94	4.04	119.9	663.0
Previsto	Bosque secundario	79,1	8,8	0.82	3.0	111.3	203.0
Previsto	Café bajo sombra	30,2	75,0	0.94	1.79	175.8	283.7
Previsto	Silvopastura	34,3	4,1	1.03	0.89	88.1	128.4
Previsto	Pastura	0,0	0,0	1.59	1.24	95.4	98.2
Previsto	Huerto casero	92,9	5,4	0.68	1.56	136.7	237.2
Aguaytía	Bosque primario	93,9	93,7	0.44	1.84	121.4	311.2
Aguaytía	Bosque secundario	69,0	27,7	0.45	2.06	83.4	182.6
Aguaytía	Café bajo sombra	77,1	0,0	0.47	1.54	61.9	140.9
Aguaytía	Silvopastura	39,5	0,0	0.78	0.39	103.2	143.9
Aguaytía	Pastura	0,0	0,0	1.2	0.69	80.8	82.7
Aguaytía	Huerto casero	42,4	13,4	0.34	0.96	72.9	129.9

Apéndice 4. Carbono secuestrado por localidades y repeticiones (t ha⁻¹)

Localidad	Repetición	Arb en pie	Arb. Caidos	Arbustivo-herbáceo	Hojarasca	Edáfico	Total
San Agustín	1	69,4	61,81	0,49	1,2	89,4	221,93
San Agustín	2	47,1	2,52	0,68	1,72	87,2	139,22
San Agustín	3	140,0	21,7	0,85	1,49	86,65	250,73
San Agustín	4	65,3	5,4	1,38	2,39	96,29	170,67
San Agustín	5	60,8	23,1	0,77	1,26	94,07	179,9
Previsto	1	40,7	12,2	1,21	2,7	97,63	154,4
Previsto	2	39,0	78,7	1,05	2,01	110,43	231,1
Previsto	3	167,5	168,1	1,43	1,74	125,11	463,9
Previsto	4	61,3	49,2	0,48	2,68	133,73	247,3
Previsto	5	89,2	17,4	0,82	1,28	139,14	247,9
Aguaytía	1	43,0	7,5	0,67	1,43	79,3	131,9
Aguaytía	2	38,7	74,6	0,69	1,48	87,0	202,5
Aguaytía	3	51,8	14,4	0,82	1,17	85,6	153,8
Aguaytía	4	79,6	14,0	0,48	1,20	86,7	182,0
Aguaytía	5	55,2	1,6	0,42	0,97	97,7	155,9



