

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE EMISIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO DEL
PÁRAMO DE CHINGAZA Y LINEAMIENTOS PARA SU CONSERVACIÓN
EN EL CONTEXTO DEL MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO.

JASON GARCIA PORTILLA

TRABAJO DE GRADO
Presentado como requisito parcial
para optar al título de

ECÓLOGO



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES
CARRERA DE ECOLOGIA
Bogotá, D.C.
Diciembre de 2003

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE EMISIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO DEL
PÁRAMO DE CHINGAZA Y LINEAMIENTOS PARA SU CONSERVACIÓN
EN EL CONTEXTO DEL MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO.

JASON GARCIA PORTILLA

Director

Dr. CARLOS GÓMEZ SÁNCHEZ (Agrólogo MSc - IDEAM)

Codirector

Prof. LUIS GUILLERMO BAPTISTE (Biólogo MSc – Universidad Javeriana)

Asesores

Dra. MYRIAM BENDECK LUGO (Química MSc – Laboratorios Agrilab Ltda.)

PhD. ROBERT HOFSTEDE (Grupo Páramo)

Dr. OMAR JARAMILLO (Geógrafo - IDEAM)

Ing. OMAR PORTILLA CHAVES (Ingeniero Geólogo MSc)

Dr. MANUEL RODRÍGUEZ BECERRA (Ingeniero Industrial MSc –
Universidad de Los Andes)

Dr. HENRY SALAZAR (Economista MSc - Instituto Alexander von Humboldt)

Dr. REINALDO SÁNCHEZ (Agrólogo MSc - IDEAM)



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES
CARRERA DE ECOLOGIA

Bogotá, D.C.

Diciembre de 2003

NOTA DE ADVERTENCIA

Artículo 23 de la Resolución No. 13 de julio de 1946: “La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus tesis de grado”.

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE EMISIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO DEL
PÁRAMO DE CHINGAZA Y LINEAMIENTOS PARA SU CONSERVACIÓN
EN EL CONTEXTO DEL MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO¹.

JASON GARCIA PORTILLA

APROBADO:

Profesor Luis Alberto Villa

Profesor Gonzalo De Las Salas

¹ La impresión de éste documento se realizó en papel reciclado.

DEDICATORIA

***A la madre suprema GAIA, por conspirar conmigo y ser fuente de
constante inspiración.***

AGRADECIMIENTOS

Contar con la fortuna de encontrar en un ejercicio trasdisciplinario, no pocas instituciones abiertas al conocimiento científico y dispuestas a colaborar, al igual que personas de muy buena fe quienes aportan bien sea con sus profundos conocimientos o con su ayuda en tantas otras diferentes formas, es algo que definitivamente no se puede valorar ni traducir en “números o datos”. Es por ello que el autor de la presente investigación agradece de manera muy sincera y profunda, el invaluable apoyo prestado por las siguientes instituciones y la desinteresada colaboración de las personas que se nombran enseguida:

En orden alfabético:

Al **Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM**, por respaldar y permitir que ésta investigación se nutriera de la valiosa información producida por éste. A los **Doctores Carlos Gómez, Reinaldo Sánchez y Omar Jaramillo**, por toda la paciencia y apoyo. A la doctora Mariela Rodríguez, por agilizar el proceso del convenio interinstitucional.

A **Laboratorios Agrilab**, por permitir realizar los análisis químicos con una altísima calidad y confiabilidad. Especialmente a la **Doctora Myriam Bendeck** por la asesoría, tanto conceptual como metodológica en el estudio de la química del suelo; así como a todo el equipo de trabajo de los laboratorios.

A la **Pontificia Universidad Javeriana**, Alma Mater, que en todo momento apoyó ésta investigación, incluso con anterioridad a la misma. Al **profesor Luis Guillermo Baptiste** por aterrizar y ayudar continuamente a darle forma a ésta investigación. Al **profesor Daniel Castillo**, toda su preocupación y

ayuda en la interpretación de la información al igual que al **Doctor Martín Alonso Rondón**. Al Director y Secretaria de la Carrera, **Dr. Juan Ricardo Gómez** y **Nancy Segura** por su atención, preocupación y apoyo así como a la **Dirección del Departamento de Química, Dr. Jaime Bernal**, por su gran colaboración.

A la **Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales U.A.E.S.P.N.N** y especialmente al **Parque Nacional Natural Chingaza**, por colaborar y permitir la realización del estudio empírico. En especial a la **Doctora Sandra Navarrete** por agilizar los procesos legales y al **Doctor Carlos Lora** por brindarme todo el apoyo necesario y, por su puesto a todo su equipo de trabajo, que estuvo pendiente de mi investigación: **Eduardo, José S., Luis Carlos Rosero, Luis Alberto (Chihuahua), Heriberto, Arnulfo y Doña Gloria**.

A la **Doctora Julia Castellanos**, por su preocupación y la valiosa información que muy amablemente facilitó; igualmente a la Dra. **Ángela Pinzón**.

A la **Doctora Enna Díaz**, quien oportunamente me colaboró proporcionándome la información por ella producida.

Al **Doctor Daniel Fonseca**, por respaldar, inspirar y dar el impulso inicial a ésta investigación.

Al **Doctor Robert Hofstede**, quien definitivamente fue una luz importantísima, que guió una buena parte del trabajo, además de realizar lo posible y también lo imposible por facilitar la información necesaria.

Al **Doctor Martin Keeley**, por todos sus comentarios críticos y revisión.

Al **Doctor Manuel Rodríguez Becerra** por su valiosa asesoría y el tiempo dedicado desde el inicio de la investigación.

Al **Doctor Henry Salazar** por sus importantes comentarios que dieron forma al documento final.

Finalmente, al apoyo más grande que abarca todos los aspectos: desde el intelectual hasta el financiero, pasando por el emocional y físico; **Mi Familia**. Especialmente a **María Isabel, mi tío Omar y mi madre Eunice**.

TABLA DE CONTENIDO:

ABSTRACT.....	15
RESUMEN.....	16
INTRODUCCIÓN.....	18
OBJETIVO GENERAL.....	20
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	20
JUSTIFICACIÓN.....	21
MARCO DE REFERENCIA.....	23
ANTECEDENTES.....	23
El Cambio Climático.....	23
Aspectos internacionales relacionados con el Cambio Climático.....	27
Los suelos, el cambio de uso de los suelos y el Cambio Climático.....	31
Efectos del Cambio Climático sobre los ecosistemas de páramo.....	36
Los ecosistemas de páramo como mitigadores del Cambio Climático.....	38
El Ciclo del Carbono.....	39
El papel de la materia orgánica en el Ciclo del Carbono.....	42
El ciclo global del carbono y los ecosistemas de páramo.....	46
MARCO TEÓRICO.....	48
MARCO CONCEPTUAL.....	49
MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	54
FASE DE CAMPO.....	54
FASE DE LABORATORIO.....	58
ANÁLISIS DE DATOS.....	59
ANÁLISIS A TRAVÉS DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA..	59

ANÁLISIS POLÍTICO – ECONÓMICO.....	60
MARCO GEOGRÁFICO.....	62
Área de estudio.....	62
Aspectos climáticos, fisiográficos y bióticos.....	63
MARCO INSTITUCIONAL.....	65
MARCO LEGAL.....	65
RESULTADOS.....	66
DISCUSIÓN.....	75
EL SUELO Y EL MANTILLO COMO SUMIDEROS DE CARBONO.....	75
EXTRAPOLACIÓN DE DATOS.....	80
EL MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO Y LOS ECOSISTEMAS DE PÁRAMO.....	83
PROBLEMÁTICA DE LOS PÁRAMOS Y OPCIONES PARA SU CONSERVACIÓN A LA LUZ DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	87
CONCLUSIONES.....	95
RECOMENDACIONES.....	97
BIBLIOGRAFIA.....	99
ANEXOS.....	105

INDICE DE TABLAS:

TABLA NO. 1 Contribuciones al calentamiento global por gases y fuentes.....	24
TABLA NO. 2 Estimaciones del contenido global de Carbono en la Vegetación y en Suelos de los principales biomas	32
TABLA NO. 3 Desplazamientos en las Zonas de Vida de Holdridge ZVH en la alta montaña colombiana por un cambio climático $2xCO_2$	36
TABLA NO. 4 Comparación de ecosistemas de páramo y selva tropical en términos de la cantidad de carbono acumulada en los compartimentos suelo y vegetación.	38
TABLA NO. 5 Resultados de estudios sobre el contenido de carbono en suelos de páramo conservados en Colombia y sus variables climáticas.....	45
TABLA NO. 6 Contenido de Carbono en compartimentos activos y de almacenaje de la Tierra.	51
TABLA NO. 7 Información básica correspondiente a las áreas de estudio.	58
TABLA NO. 8 Tipo de suelo, Localización, y vegetación presente en las áreas de estudio.	66
TABLA NO. 9 Carbono orgánico total, por compartimentos, lábil y estable en los tipos de suelo del páramo de Chingaza.	68
TABLA NO. 10 Cobertura de páramos en Colombia y superficie de éstos con contenido muy alto de carbono	73
TABLA NO. 11 Comparación de la rentabilidad de un proyecto MDL de conservación en el páramo y su costo de oportunidad.....	74

INDICE DE FIGURAS:

FIG. 1: Representación del efecto invernadero.....	18
FIG. 2. Diagrama esquemático de la problemática asociada con el cambio climático y las variables que son analizadas en ésta investigación	23
FIG. 3: Anomalías en las temperaturas medias de la superficie mundial con respecto al promedio del período comprendido entre 1880 y 1920 de acuerdo con el registro instrumental, comparadas con cuatro simulaciones de un modelo climático.....	25
FIG. 4. Zonas bioclimáticas actuales y en escenario 2xCO ₂	38
FIG. 5. Porcentajes de carbono orgánico en la superficie de los suelos (0-20 cm) del área Medina – Río Guavio en el oriente de Cundinamarca	46
FIG. 6. Toma de muestras de mantillo	57
FIG. 7. Toma de muestras de suelo mineral	58
FIG. 8. Ejemplos de áreas de muestreo	58
FIG 9. Triangulación de la información	61
FIG. 10. Contenido Total de Carbono en el Suelo y Mantillo y % de Carbono Orgánico Libre (COL) en los suelos del páramo de Chingaza.	67
FIG 11. Porcentaje de aporte al carbono total por compartimentos (Mantillo, Carbono ligado a la Fracción Mineral (C ligado a la F.M.)y Carbono Orgánico libre (COL)) en los suelos del páramo de Chingaza.	68
FIG 12. Distribución porcentual del carbono (COL + C ligado a la F.M.) y otros compuestos en los suelos del páramo de Chingaza.	69
FIG 13. Distribución porcentual del carbono y otros compuestos en el mantillo del páramo de Chingaza.	69
FIG 14. Resultados del contenido de carbono en suelos de páramo naturales de los estudios consultados y de éste estudio, en relación con la altitud.	70
FIG 15. Resultados del contenido de carbono en suelos de páramo naturales de los estudios consultados y de éste estudio, en relación con la temperatura promedio multianual.	70
FIG 16. Resultados del contenido de carbono en suelos de páramo naturales de los estudios consultados y de éste estudio, en relación con la precipitación promedio multianual.	71
FIG. 17. Distribución del Contenido de carbono en los suelos colombianos.	72
FIG. 18. Distribución del Contenido de carbono en suelos de páramo colombianos	73

INDICE DE MAPAS:

MAPA NO. 1 Contenido de carbono en los suelos del mundo.....	34
MAPA NO. 2 Contenido de carbono en los suelos de Suramérica.....	34
MAPA NO. 3 Contenido de carbono en los suelos de Colombia.....	35
MAPA NO. 4 Clasificación de los suelos de páramo de acuerdo con el IPCC y ubicación de los sitios muestreados.....	55
MAPA NO. 5 Ubicación espacial del área de estudio.	62

INDICE DE ANEXOS:

ANEXO NO. 1 Contenidos de Carbono Orgánico por superficies de suelos en los distritos de páramos de Colombia.	106
ANEXO NO. 2 Distribución promedio de los contenidos de Carbono Orgánico total en mantillo, suelo y en la fracción mayor de 100µm por unidad de muestreo.	107
ANEXO NO. 3 Distribución de los contenidos de Carbono Orgánico, pesos y capacidad de retención de humedad del mantillo por unidades de muestreo.	108
ANEXO NO. 4 Distribución de los contenidos de Carbono Orgánico total, en la fracción mayor de 100µm, peso y capacidad de retención de humedad del suelo por unidades de muestreo.	109
ANEXO NO. 5 Principales cálculos y conversiones de los resultados.	110

ABSTRACT:

The increasing concentrations of GHG (Greenhouse Gases) in the earth's atmosphere, such as carbon dioxide (CO₂) from human sources, have caught the attention of international community because of the relation it has with climate change. The most important international agreements reached in order to stabilize GHG concentrations are the United Nations Framework Convention on Climate Change, and the Kyoto's Protocol. In the latter, the Clean Development Mechanism (CDM) is included as an instrument to support investment by developed countries in projects for both the reduction and capture of GHG in developing countries. Forests have been recognized as capture projects; however, conservation projects have not been recognized as providing effective carbon sinks.

The Carbon Cycle is very complex. Oceans are the most important sinks, and soils can retain three times more carbon than vegetation. In this study, the soils of the **páramo** ecosystem are analysed in relation to the Carbon Cycle. The scientific evidence allows an appreciation of the importance of natural ecosystems in CDM projects. The soils of Chingaza National Park, Cundinamarca, were studied in the field. Organic carbon from the light and heavy fractions was characterized. Carbon within the contained in light fraction and litter is easily returnable to the atmosphere as CO₂.

Chingaza soils were classified according to the IPCC methodology. A map was made on that basis. The relevance of the incorporation of the **páramo** ecosystem into CDM projects was made through the analysis of empirical and secondary information, as well as expert consultations. Chingaza's soils comprise 10% of carbon and 70% of water; 17% of the organic carbon is light fractions. There were no differences in carbon in soil, litter and light fraction between soil types, either in moist and dry areas.

In order to conserve **páramo** ecosystems in the climate change context, it is shown that consideration must be given to the light fractions, thereby requiring further research into this topic. Substantial differences with other research data are shown from differences in data presentation.

Non-acceptance of conservation projects in the CDM results more from political interests than technical-scientific criteria. Conservation of ecosystems like **páramo** should be considered in CDM, but international tendencies tend not to address this, which is why it is necessary to explore new international incentives in order to conserve this important ecosystem as a mitigator of Climate Change. Those kind of incentives will must take into account the cost of opportunity.

Key words: *Global Climate Change, Kyoto Protocol, Clean Development Mechanism, páramo ecosystems, carbon in soils, litter and free organic matter, light and heavy fractions of carbon.*

RESUMEN

El aumento en las concentraciones de gases como el dióxido de carbono atmosférico de origen antrópico, ha llamado la atención de la comunidad internacional, dado que este efecto es un gran tensionante del sistema climático global. Entre los acuerdos establecidos para estabilizar las concentraciones de éste y otros gases en la atmósfera se encuentran la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y su Protocolo de Kyoto. En el último se establece el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) como un instrumento a través del cual los países industrializados podrían invertir en proyectos de reducción o captación de emisiones de gases de efecto invernadero en los países en vías de desarrollo. Dentro de los proyectos de captación se encuentra el establecimiento de plantaciones forestales. Los proyectos de conservación de ecosistemas como sumideros de carbono atmosférico han sido hasta el momento descartados.

Se ha documentado que el ciclo global del carbono es bastante complejo. Los océanos son los sumideros más importantes, datos recopilados de investigaciones en ecosistemas terrestres indican que el suelo puede albergar tres veces más carbono que la propia vegetación.

La presente investigación busca, brindar unos elementos que permitan entender de una mejor forma el ciclo del carbono en los ecosistemas de páramo y de ésta forma argumentar la importancia de incluir ecosistemas como éste dentro de los proyectos MDL.

Se realizó un estudio del contenido de carbono en los suelos del páramo de Chingaza, se caracterizó el carbono de tres compartimentos, el suelo mineral, el mantillo y la materia orgánica libre. De éstos los dos últimos son fácilmente liberables a la atmósfera en forma de CO₂

Se clasificaron los suelos del páramo de Chingaza de acuerdo con la metodología del IPCC, y se realizó un mapa (Mapa No. 4) con éstos tipos de suelo.

A través del estudio de caso del páramo de Chingaza, la recopilación de información secundaria y la consulta a expertos, se realizó un análisis de la pertinencia de la inclusión de éstos ecosistemas dentro del MDL.

Se encontró que los suelos del Páramo de Chingaza están constituidos en alrededor de un 10% de carbono y que más del 70% del suelo es agua. El 17% del carbono orgánico total del suelo corresponde a fracciones lábiles que serían fuente neta de emisiones de CO₂. No se encontraron diferencias significativas en el contenido de carbono en suelo, mantillo y materia orgánica libre entre tipos de suelo ni vertientes húmedas y secas.

El principal criterio para conservar los suelos de éstos ecosistemas a la luz del cambio climático debe tener en cuenta estas fracciones lábiles. Las futuras investigaciones en éste tema deben considerar éste aspecto. Por su parte, las fracciones estables corresponden a un compartimento de almacenaje de carbono.

Se encontraron grandes diferencias en los datos de otras investigaciones, lo que se puede deber a formas diferentes de expresar los resultados.

La no inclusión de los proyectos de conservación dentro del MDL, responde más a intereses de tipo político que a criterios técnicos .

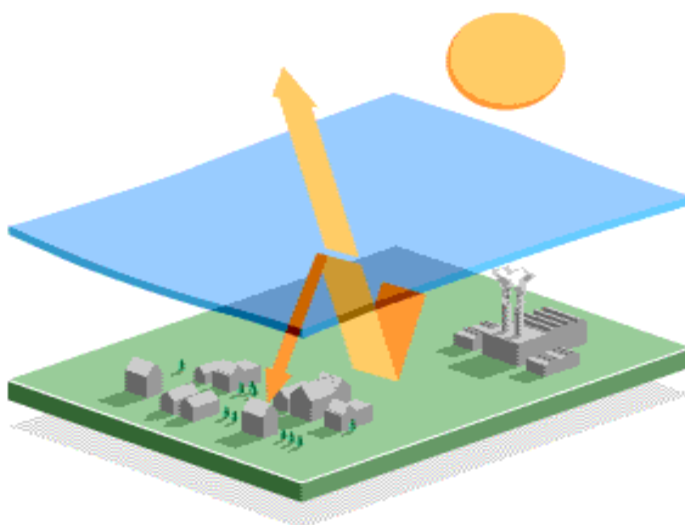
Aunque los proyectos de conservación de ecosistemas como el páramo deberían considerarse en el MDL, las tendencias internacionales indican que esto no ocurrirá, por lo cual se deben explorar otros incentivos de carácter internacional para proteger éstos ecosistemas como mitigadores del cambio climático. Al conservar los ecosistemas de páramo, se debe tener en cuenta que esos incentivos consideren al menos el costo de oportunidad.

Palabras claves: *Cambio climático global, Protocolo de Kyoto, Mecanismo de Desarrollo Limpio, ecosistemas de páramo, carbono en suelos, mantillo y materia orgánica libre, fracciones estables y libres de carbono.*

INTRODUCCIÓN:

La ciencia contemporánea tiene certidumbre sobre la existencia del efecto natural de invernadero, el cual mantiene la tierra más caliente de lo que sería si éste no existiera. Este efecto consiste en que gases de bajas proporciones en la atmósfera, tienen la propiedad de permitir a los rayos del sol penetrar hasta la superficie de la Tierra, pero retardan el flujo de retorno de la radiación infrarroja. Entre éstos gases se incluyen el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros menos abundantes, como el óxido nitroso y metano, que calientan la superficie de la Tierra, cuando ésta envía calor o radiación infrarroja hacia arriba y éstos gases absorben e irradian ésta energía en todas las direcciones. Una parte de ésta energía retorna a la superficie de la Tierra y la calienta; el sistema de invernadero que ocurre en la Tierra es representado en la Figura 1. Los gases mencionados son denominados Gases de Efecto Invernadero (GEI) y un aumento en sus concentraciones eleva la temperatura global con casi total certidumbre científica. El clima global está cambiando como consecuencia de la acción humana, además de su variabilidad natural. Que el planeta se esté volviendo más caliente es una de las manifestaciones más dramáticas del cambio climático y, en general, de la crisis ambiental global que de continuar sus actuales tendencias, tendría graves consecuencias para la vida en la Tierra (Rodríguez 1994).

FIG. 1: Representación del efecto invernadero



Fuente: BBC 2001²

² BBC. Cambio Climático Global. Climate Change -from the BBC weather centre- <http://www.bbc.co.uk/climate> consultado en abril de 2001.

Dado que el dióxido de carbono es uno de los principales gases de efecto invernadero debido a su concentración, se han motivado eventos a nivel internacional para tomar medidas, tanto para limitar las emisiones de éste y otros gases, como para promover la conservación y reforzamiento de los depósitos y sumideros de carbono, entre los que se encuentran los océanos, los bosques y otros tipos de sistemas capaces de capturar dicho elemento. Entre estos eventos, cabe destacar, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) que busca detener el proceso de cambio climático que experimenta el planeta por causas antropogénicas y, su Protocolo de Kyoto que establece las bases de un mercado de reducción de emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI).

Hasta el presente, el Protocolo de Kyoto (PK), ha reconocido a las plantaciones forestales como los únicos sumideros de carbono que entrarían en el mercado de reducción de emisiones, como se verá más adelante. La presente investigación resalta la importancia de conservar ecosistemas ecuatoriales estratégicos como el páramo, por la cantidad de carbono que retienen, sobre todo en el compartimiento suelo, que de no ser conservado, sería emitido en forma de CO₂ atmosférico y contribuiría al cambio climático.

Además de lo anterior, éste ecosistema es particularmente vulnerable a un eventual cambio climático. Un aumento en la temperatura global, significaría el desplazamiento de las zonas de vida de páramo hacia las partes más altas, sin embargo la posibilidad de desplazamiento vertical no existe en todos los páramos del país. El desplazamiento tendría consecuencias negativas muy acentuadas en los páramos, superpáramos y el nivel nival. El escenario de cambio significaría en muchos casos una disminución progresiva del área de páramo, hasta su eventual desaparición. Los páramos son además, ecosistemas altamente especializados a las condiciones ambientales en las que se presentan y por ésta razón también son altamente vulnerables a cualquier disturbio (IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo 2002).

En ésta investigación se analizó principalmente la posible emisión del CO₂ retenido en el suelo del páramo de Chingaza (un ecosistema silvestre), por su cambio de uso, lo cual tendría repercusiones directas en el efecto invernadero y por ende en el Cambio Climático. Se aportan aquí elementos de análisis que se podrían incorporar en discusiones sobre las fracciones lábiles y estables del suelo, dado que se hace una separación y cuantificación de las mismas y por lo tanto se puede conocer con un mayor grado de certidumbre en qué forma un cambio de uso del suelo en un ecosistema silvestre como el páramo redundaría en una liberación del carbono del suelo en forma de dióxido de carbono a la atmósfera.

Dado que, como se evalúa más adelante, el MDL no es potencialmente un instrumento muy eficaz para lograr la conservación de los páramos, en éste

estudio también se exploran a través de fuentes secundarias posibles opciones para la conservación de éste ecosistema como mitigador del cambio climático.

OBJETIVO GENERAL:

Evaluar las oportunidades de la inclusión y los riesgos ambientales de la exclusión del ecosistema de páramo en el Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- ☞ Estimar el carbono contenido en los suelos del páramo de Chingaza.
- ☞ Estimar el contenido de carbono en los páramos colombianos.
- ☞ Evaluar el Mecanismo de Desarrollo Limpio como alternativa potencial para conservar los ecosistemas de páramo.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN:

Los ecosistemas de páramo retienen un alto contenido de carbono en sus suelos debido a sus bajas tasas de mineralización, por lo que se plantea por un lado la pregunta: ¿Cuánto de ese carbono es liberable a la atmósfera en forma de dióxido de carbono (importante GEI) en el caso específico del páramo de Chingaza?.

Por otra parte, teniendo en cuenta que las negociaciones internacionales sobre Cambio Climático, específicamente en el tema de Cambio de Uso del Suelo, han rechazado la inclusión de proyectos de conservación dentro del MDL, se plantea la pregunta:

¿Valdría la pena considerar proyectos de conservación de ecosistemas naturales como el páramo de Chingaza dentro de las actividades MDL en una eventual ratificación del Protocolo de Kyoto?.

JUSTIFICACIÓN:

Una de las razones por las que no se incluyen los proyectos de conservación de ecosistemas naturales como sumideros de carbono en las negociaciones internacionales de cambio climático, es que gran parte de la evidencia científica, principalmente proveniente de estudios realizados en ecosistemas de zonas templadas y boreales muestran que éstos, una vez alcanzada su madurez se encuentran en equilibrio en cuanto a sus tasas de liberación y captura de CO₂ (Houghton 1990 citado en Del Valle *et al.* 2003), por lo que solo se los considera en términos del stock de carbono acumulado y no como sumideros. Sin embargo, es necesario realizar investigaciones en ecosistemas ecuatoriales que permitan un análisis que tenga en cuenta todas las capturas y emisiones procedentes de la franja ecuatorial (Del Valle *et al.* 2003), lo anterior lograría tener un grado de certidumbre suficiente para tomar la decisión más acertada acerca de la inclusión de los ecosistemas naturales ecuatoriales como sumideros³. Colombia, como la gran mayoría de los países en desarrollo, tiene un interés particular en que no se excluya el sector forestal y de cambio en el uso del suelo del Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto (MDL), por ser un sector con grandes ventajas comparativas, y amplios beneficios sociales y ambientales, sin embargo, los proyectos de conservación tienen pocas posibilidades de ser incluidos (Ministerio del Medio Ambiente & Banco Mundial 2000).

La importancia de la presente investigación radica en aportar elementos sobre la inclusión en el Protocolo de Kyoto, de coberturas fijadoras y retenedoras de carbono diferentes a las plantaciones, específicamente los ecosistemas de páramo conservados, a partir del análisis de evidencias científicas a nivel teórico y empírico. En Colombia, los ecosistemas silvestres representan un gran potencial como sumideros de carbono; pues más de la mitad del territorio continental colombiano (56.05%) está constituido por ecosistemas naturales (IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo 2001).

Los páramos, aparte de ser considerados ecosistemas estratégicos por su oferta de servicios ambientales, entre los que cabe resaltar la regulación hídrica; poseen un importante contenido de carbono acumulado que no solo está presente en la biomasa epigea sino en los cojines de materia orgánica del suelo, debido a las bajas tasas de descomposición en éstos ecosistemas (IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo 2002).

Según Rondón (2000), los suelos de páramo, en general, son espesos y están principalmente constituidos por materia orgánica en diversos estados

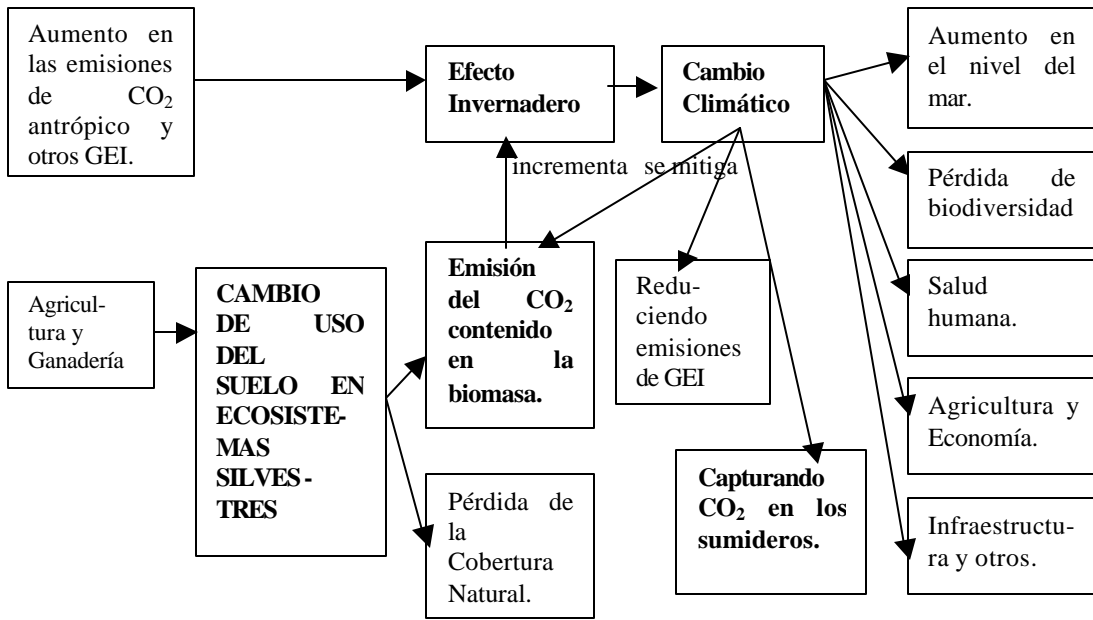
³ Rodríguez, Manuel. 2002. Comunicación Personal.

de descomposición; en algunos lugares pueden tener tanto como 50% de materia orgánica frente a 3% promedio de otros suelos.

Este autor afirma que no se posee un inventario ni siquiera aproximado de la cantidad de carbono total almacenado en los suelos de páramo, pero se estima que es considerable. Si la cobertura vegetal del páramo desaparece por cualquier causa, la superficie quedaría expuesta a la acción directa del sol que propiciaría la desecación del suelo, cambiando su estructura y permitiendo que la materia orgánica se descomponga más rápidamente. Además, el color negro de los suelos del páramo debido a la alta concentración de compuestos húmicos favorecería la absorción de la radiación solar. La acción simultánea de estos factores, generaría un aumento en la temperatura del suelo, que unida al propio aumento de la temperatura del ambiente, aceleraría los procesos microbiológicos de descomposición. La consecuencia será la oxidación de la materia orgánica, liberando grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera. Los suelos de páramo han sido, unos sumideros muy eficientes de carbono atmosférico. Pero como resultado de la intervención antrópica, podrían devolver rápidamente sus reservas de nuevo a la atmósfera, contribuyendo al calentamiento global y creando un sistema de retroalimentación positiva en el que se acortaría el tiempo de vida de éste ecosistema (Rondón 2000). Este ecosistema debe ser estudiado entonces como mitigador del cambio climático y por su vulnerabilidad ante el mismo.

MARCO DE REFERENCIA

FIG. 2. Diagrama esquemático de la problemática asociada con el cambio climático y las variables que son analizadas en ésta investigación (**negrita**).



Como se explica claramente en las siguientes páginas, un aumento en las concentraciones de GEI de origen antrópico, bien sea por actividades industriales o por cambio de uso del suelo, inducen un mayor calentamiento de la Tierra a través del Efecto Invernadero, el cual es un gran tensionante del Cambio Climático. Éste último fenómeno, que se ha venido dando desde la propia existencia del planeta y acentuado en los últimos siglos por las actividades humanas tiene consecuencias importantes en aspectos físicos, bióticos, económicos y de salud humana, entre otros. Dos formas importantes que pueden mitigar éste proceso, son la reducción de emisiones en la fuente y la captura de GEI en los sumideros de carbono.

ANTECEDENTES:

El Cambio Climático

Desde la segunda mitad del siglo XX se ha podido comprobar con medidas instrumentales directas el rápido incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, en algunos casos con

relaciones exponenciales, como consecuencia de las actividades humanas; es así como desde el inicio de la revolución industrial –finales del siglo XVIII- la concentración del dióxido de carbono (el gas de invernadero natural más importante junto con el vapor de agua), ha aumentado un 30%. En la actualidad este aumento y el de otros gases producen una alteración del equilibrio entre radiación entrante y saliente superior a la suma del resto de las perturbaciones conocidas y en consecuencia podría ser la causa dominante del calentamiento observado en los últimos cien años (Balairón 2000 en BBVA 2000). La Tabla 1 muestra una evaluación de los aportes al calentamiento global según gases y fuentes.

TABLA NO. 1 Contribuciones al calentamiento global por gases y fuentes.

Gases de efecto invernadero	Porcentaje de contribución	Fuentes de Emisión de CO ₂		
N ₂ O	6			
CH ₄	16			
CFCs	23			
CO ₂	55	Deforestación más descomposición o quema.	12	
		Combustibles Fósiles	Petróleo	43
			Carbón	
Gas				
Totales	100	Total Fuentes Emisión de CO ₂	55	

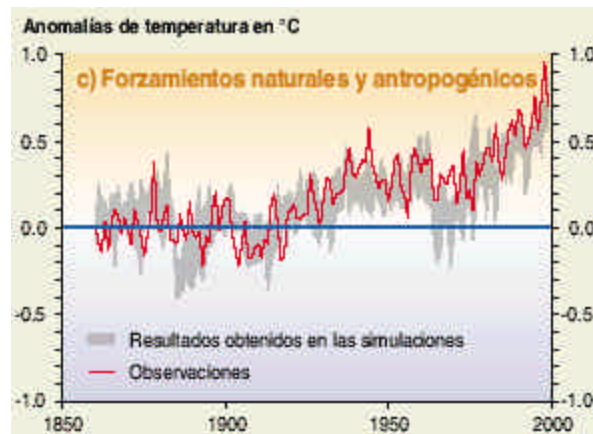
Fuente: BBVA 2000

En el siglo pasado, las acciones humanas alteraron de forma notable los ciclos biogeoquímicos de la tierra. Desde 1850, el dióxido de carbono atmosférico aumentó en un 30% y el metano en más del 100%. También las concentraciones de ozono estratosférico han disminuido, lo que incrementa la radiación ultravioleta que penetra a la superficie de la tierra (Asrar y Dozier 1994). Es prácticamente seguro⁴ que el aumento de las concentraciones de CO₂ en el siglo XXI se debe al consumo de combustibles fósiles (IPCC 2001a).

⁴ De acuerdo con IPCC 2001a, en éste documento se toman las siguientes expresiones para indicar cálculos de confianza basados en apreciaciones: prácticamente seguro (más del 99 % de probabilidades de que el resultado sea verdad); muy probable (90 a 99 % de probabilidades); probable (66 a 90 % de probabilidades); probabilidad media (33 a 66 % de probabilidades); improbable (10 a 33 % de probabilidades); muy improbable (1 a 10 % de probabilidades); excepcionalmente improbable (menos del 1 % de probabilidades).

Las observaciones muestran que la temperatura global ha aumentado en 0.6°C en los últimos 100 años, con la mayor variación ocurrida en los últimos 50 años, tal como se observa en la Figura 3. Los modelos climáticos proyectan que la temperatura aumentará entre 1.4 - 5.8°C durante el período 1990-2100. De ser así, este aumento sería el mayor cambio experimentado en los últimos 10.000 años. Este radical cambio tendría un impacto significativo en el ambiente global y por ende en las condiciones de vida en todo el planeta. Se espera que durante el período 1990-2100, el nivel de los océanos aumente entre 9-88 cm, lo que originaría que gran parte de muchas ciudades costeras del mundo queden totalmente sumergidas, problemas de inundaciones en áreas costeras e incrementos en los daños potenciales de las tormentas. Entre otros efectos se incluyen aumentos en las precipitaciones y cambios en la severidad o en la frecuencia de los eventos extremos como huracanes y tornados. Las zonas climáticas cambiarían de ubicación y muchos ecosistemas se desplazarían dando como resultado la disminución de su estabilidad y la extinción de muchas especies (IPCC 2001a).

FIG. 3: Anomalías en las temperaturas medias de la superficie mundial con respecto al promedio del período comprendido entre 1880 y 1920 de acuerdo con el registro instrumental, comparadas con cuatro simulaciones de un modelo climático



Fuente: IPCC 2001b

El cambio climático proyectado ha de tener efectos beneficiosos y adversos en los sistemas ambientales y socioeconómicos, pero cuanto mayores sean los cambios y su velocidad, más predominarán los efectos adversos. Se prevé que los impactos adversos del cambio climático afecten de forma desproporcionada a los países en desarrollo y las personas más pobres dentro de los países. Los ecosistemas y las especies son vulnerables a los cambios climáticos y a otros problemas (como lo muestran los impactos observados de los recientes cambios regionales de temperatura) y algunos sufrirán daños irreversibles o incluso desaparecerán. En algunas latitudes medias y altas, la productividad de las plantas aumentaría debido a la interacción entre una concentración elevada de CO₂, temperaturas en

aumento, y cambios de la humedad de los suelos, lo que determina que muchos ecosistemas terrestres están almacenando cantidades crecientes de carbono. Sin embargo, resultados recientes confirman que ocurren ganancias de productividad pero sugieren que son más pequeñas sobre el terreno que lo indicado en los experimentos de parcelas de plantas. Por lo tanto, la absorción de dióxido de carbono terrestre puede deberse más a cambios en el uso de la tierra que a efectos directos de elevadas concentraciones de CO₂ y el clima. El grado con el que los ecosistemas terrestres continúen siendo sumideros netos de carbono no es seguro debido a las interacciones complejas entre los factores anteriormente mencionados, por ejemplo, los ecosistemas terrestres árticos y los humedales pueden actuar tanto de fuente como de sumideros (IPCC 2001c). Además, es probable que, la biosfera pudiera estar acumulando mucho carbono, debido al aumento en la producción primaria; sin embargo, aunque la producción global hubiera aumentado, quedaría por demostrar que ello represente también una mayor acumulación de biomasa vegetal y de materia orgánica en el suelo, tal como debió ocurrir en el pasado cuando la atmósfera era reductora y poco a poco se fue volviendo oxidativa. Por su parte, son considerables las cifras de las talas a que vienen sometidos los bosques en las últimas décadas, particularmente los de las zonas ecuatoriales, así como la tendencia generalizada al reemplazo de bosques por cultivos en todos los continentes. Las estimaciones indican que la biosfera, se encuentra actualmente emitiendo al menos una quinta parte de la cantidad de emisiones de CO₂ total a escala global. De hecho, la destrucción de bosques ha supuesto una oxidación neta de materia orgánica por valor de 1,6 Gigatoneladas (Gt) de carbono anual, sumada a las 5,5 Gt de C procedentes de la combustión industrial (Díaz. 2000 en BBVA 2000).

A largo plazo, la captura neta de CO₂ por parte de los ecosistemas naturales debería ser nula por cuanto el crecimiento se compensa con la pérdida de detritos y por la mortalidad. No obstante, Philips *et al.* (1998) citados en Del Valle *et al.* 2003 determinaron en 478 parcelas permanentes distribuidas en los bosques ecuatoriales húmedos en su fase madura de todo el mundo, que estos bosques mostraron tasas positivas de aumento del carbono de entre 0.39 y 0.22 t ha⁻¹ a⁻¹, lo que contradice la anterior hipótesis. El efecto fertilizante del CO₂ podría ser la clave de éste resultado. Hay otros resultados similares como los de Grace *et al.* (1996) y Malhi *et al.* (1998) citados en Del Valle *et al.* 2003. Estos últimos encontraron que los bosques primarios amazónicos funcionan como sumidero neto de 2.2 tC ha⁻¹ a⁻¹ (Del Valle *et al.* 2003).

Los modelos de ecosistemas indican que la absorción adicional de dióxido de carbono de la atmósfera mundial como consecuencia indirecta de las actividades humanas subsistirá probablemente durante varios decenios en los ecosistemas, aunque es posible que disminuya de manera gradual, y los ecosistemas podrían incluso convertirse en fuente. Ello se debería en parte a que la capacidad de los ecosistemas para absorber más carbono podría

estar limitada por los nutrientes y por otros factores biofísicos. Otra razón es que la tasa de fotosíntesis en algunos tipos de plantas podría no crecer indefinidamente a medida que aumente la concentración de dióxido de carbono, en tanto que la respiración heterotrófica aumentará previsiblemente si suben las temperaturas. Hay que tener también en cuenta la degradación de los ecosistemas que puede acarrear un cambio del clima. Estas conclusiones se basan en el efecto del CO₂ futuro y del cambio climático sobre el actual sumidero únicamente, y no tienen presentes ni la futura deforestación ni las acciones encaminadas a potenciar los sumideros terrestres para los que no se han realizado análisis comparables. Dado el grado de incertidumbre actual de nuestros conocimientos respecto de la aclimatación de los procesos fisiológicos, de las limitaciones climáticas y de las respuestas recíprocas entre los distintos procesos, las proyecciones que alcancen más allá de unos cuantos decenios serán altamente inciertas.

En ausencia de grandes alteraciones, los bosques recién plantados o en regeneración seguirán absorbiendo carbono durante 20 a 50 años, o más aún, una vez establecidos, dependiendo de las especies y de las condiciones del lugar, aunque toda proyección cuantitativa que abarque más allá de unos decenios será incierta (IPCC 2000).

Muchos sistemas físicos son vulnerables al cambio climático; por ejemplo el impacto de mareas de tempestad costeras se verá exacerbado por la elevación del nivel del mar, y los glaciares y el permafrost continuarán su retirada (IPCC 2001a). La sociedad experimentará nuevos riesgos y presiones. Algunas regiones tendrán escasez de agua y de alimentos debido a los cambios en los patrones climáticos. El aumento en el nivel del mar podrá causar daños en la infraestructura de algunas ciudades costeras. Las consecuencias de los daños físicos y económicos podrían ser catastróficas (Falconer, *et al.* 2002).

Aspectos internacionales relacionados con el Cambio Climático

La Comunidad Internacional empezó a tomar en serio el tema del Cambio Climático al final de 1990, cuando se empezó a hablar de la creación de un convenio mundial de Naciones Unidas que tratara el tema, lo que llevó a la adopción de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (European Commission 2002).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC o UNFCCC por sus siglas en inglés) celebrada el 9 de mayo de 1992 en Nueva York (EE.UU.), tuvo como objetivos fundamentales proteger el sistema climático para las generaciones presentes y futuras mediante la cooperación de todos los países y su participación en una respuesta internacional efectiva y apropiada, de conformidad con sus capacidades respectivas y sus condiciones sociales y económicas y, lograr la

estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera en un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático, en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible (objetivo promovido por el Protocolo de Kyoto) (Hernández 1998). Esta Convención ha sido ratificada por 183 países, lo que corresponde al 96% de la totalidad de los estados (United Nations 2002).

En 1997 en Kyoto, Japón, se estableció el "Protocolo de Kyoto a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", el cual promueve el objetivo del artículo 2 de la misma y "La promoción de un desarrollo sostenible". En este protocolo se reafianza y contribuye a la comprensión de lo establecido en la CMNUCC sobre las responsabilidades comunes pero diferenciadas de los Estados (ASOCARS 2002). Este acuerdo ha sido ratificado por 71 países, es decir el 37% de la totalidad de los estados (United Nations 2002). Sin embargo, durante la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible Johannesburgo 2002, también ratificó el Protocolo Canadá (Red de Desarrollo Sostenible 2002).

El Convenio de Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto establecieron las bases de un mercado de reducción de emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI). Crearon el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) para reducir el costo de cumplimiento de las metas de reducción de emisiones asumidas por los países industrializados y promover el desarrollo sostenible de países en vías de desarrollo. El MDL permite que los grandes emisores inviertan parte de sus recursos de cumplimiento en proyectos costo-efectivos en los países en desarrollo. Expertos y entidades multilaterales comprometidos con el tema estiman que el MDL tiene el potencial para generar inversiones en países en desarrollo de alrededor de \$7.500 millones de dólares anuales si el Protocolo fuera ratificado por las partes (Ministerio del Medio Ambiente & Banco Mundial 2000).

El Mecanismo de Desarrollo Limpio es un instrumento de cumplimiento integrado por dos dimensiones: facilitador y sancionatorio. Como facilitador permite que los países desarrollados que no han cumplido pero quieren hacerlo puedan disponer de alternativas, como las asesorías y la asistencia técnica. Como sancionatorio, incluye una serie de medidas especiales, que van desde un llamado político, pasando por el desarrollo de un plan de cumplimiento, hasta la prohibición del Mercado de Cambio de Inversiones.

Si bien en los acuerdos anteriores fueron los países desarrollados los que se comprometieron a colaborar con los países en vía de desarrollo para alcanzar los objetivos del Convenio mediante la transferencia de tecnología y el suministro de recursos de toda índole, recientemente el Mecanismo de Desarrollo Limpio introdujo uno nuevo, denominado de Flexibilidad, que consiste en la instauración del comercio de emisiones, con el fin de ayudar a

los países desarrollados a cumplir sus compromisos de reducción de emisiones.

El Protocolo establece unos topes de emisiones para cada uno de los países, de obligatorio cumplimiento. El mecanismo surge del reconocimiento de los países desarrollados de que, si bien han realizado ya el gasto energético que necesitaban para lograr lo estándares de vida que hoy exhiben, para sostenerlos necesitarán elevar la demanda y consumo de los sistemas de energía disponibles. Esto equivale a aumentar en orden directamente proporcional sus emisiones, con lo cual superarán indefectiblemente el tope que les fue impuesto. Para remediar esta situación, se ideó el denominado "comercio de emisiones", que funciona a través de tres vías:

- ✍✍ El comercio de emisiones entre los 38 países desarrollados que en el Protocolo acordaron una cantidad permitida de emisiones para cada uno durante el período 2008-2012. Si durante dicho período un país emite menos de lo autorizado, puede vender la diferencia entre la cantidad permitida y lo efectivamente emitido a otro país. De esta manera, el país comprador puede superar su límite de emisión en dicha cantidad. Se busca con esto mantener el objetivo global de reducción del 5,2% de las emisiones de gases de efecto invernadero para estos 38 países.
- ✍✍ El comercio de unidades de reducción de emisiones obtenidas en proyectos concretos entre países. La idea es que los países ricos puedan invertir en proyectos en otros países que supongan una reducción de emisiones adicional a la que se produciría en ausencia del proyecto.
- ✍✍ La modalidad conocida como "implementación conjunta", que se da entre países desarrollados y el "Mecanismo de Desarrollo Limpio", que opera entre países desarrollados y en vías de desarrollo (ASOCARS 2002).

El MDL considera tres tipos de proyectos a saber: los que reducen emisiones en la fuente, los que capturan o "secuestran" carbono en los sumideros y, los mixtos (Oficina Argentina del Mecanismo para un Desarrollo Limpio, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable 2003).

A través de las actividades de captura de carbono, el MDL tiene el potencial para reducir la pérdida de diversidad biológica, proteger fuentes de agua y acelerar la reforestación de bosques degradados. El MDL puede proveer los recursos financieros necesarios para la conservación y uso sostenible de los ecosistemas naturales en los países en desarrollo (UNDP 1998).

El papel de los sumideros de gases efecto invernadero, y en particular los bosques, es tenido en cuenta desde la Convención. Es así como dentro de

los compromisos de los países para alcanzar el objetivo de la Convención se incluyen el de la conservación y reforzamiento de los sumideros y depósitos de gases efecto invernadero, incluyendo la biomasa y los bosques.

En la actualidad, en las negociaciones internacionales sobre cambio climático (COP⁵ 7. Decisión 12/CP 7), únicamente han sido tenidos en cuenta los proyectos de forestación y reforestación⁶ en materia de bosques como sumideros de carbono. Por el contrario, los proyectos de conservación de sumideros no han sido considerados; esto constituye uno de los factores que puede afectar el nivel de participación de Colombia en los mercados internacionales de reducción de emisiones (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. sin pub.).

La exclusión de los proyectos de conservación se debe a que en ecosistemas naturales, es muy difícil determinar si la pérdida de cobertura vegetal ocurriría en ausencia de los incentivos de éste mercado, por lo que muchos países podrían tomar ventaja de ésta situación argumentando que sus ecosistemas están en peligro (UNDP 1998). Sin embargo, los países no Anexo B⁷ (e.g. Colombia), no tienen contabilizado buena parte del carbono contenido en sus ecosistemas naturales lo cual les impide administrar proyectos de conservación de sumideros de carbono (no pueden controlar fugas)⁸, por otra parte, las plantaciones fijan carbono constantemente desde su establecimiento, contrario a los ecosistemas naturales que una vez llegan a su clímax, su biomasa no presenta tasas positivas de acumulación, sino que oscila alrededor de una media, por lo que se encuentran en un equilibrio dinámico. Además, desde hace más de quince años, se han considerado los ecosistemas naturales ecuatoriales, en especial los bosques, como fuentes netas de carbono atmosférico con un aporte estimado de 1.6 Gt al año, por lo que algunos países desearían compromisos explícitos de control de esta fuente de CO₂ en países que, por no estar en el Anexo B, no tienen compromisos de reducción (Del Valle, *et al.* 2003).

Los criterios de elegibilidad que corresponden a los aspectos que se deben considerar al presentar los proyectos forestales y de cambio de uso del suelo dentro del MDL son los siguientes:

⁵ Conferencia de las Partes. Entiéndase por partes los países firmantes del Protocolo de Kyoto.

⁶ Forestación – conversión, por actividad humana directa, de tierras que carecieron de bosque durante un período mínimo de 50 años en tierras forestales mediante plantación, siembra o fomento antropógeno de semilleros naturales;

Reforestación – conversión por actividad humana directa de tierras no boscosas en tierras forestales mediante plantación, siembra o fomento antropógeno de semilleros naturales en terrenos donde antiguamente hubo bosques, pero que están actualmente deforestados.

⁷ Países que no figuran en el Anexo B de la CMNUCC. El Anexo B corresponde a los países industrializados y de economías en transición.

⁸ Hofstede, Robert. 2003. Comunicación Personal.

☞☞ **Contribución al Desarrollo Sostenible:** Los proyectos deben presentar impactos positivos en los aspectos ambientales, económicos y sociales.

☞☞ **Adicionalidad:** Las reducciones de emisiones o el secuestro de carbono deben ser adicionales a las que hubieran ocurrido en ausencia del proyecto. Para definir la adicionalidad de un proyecto se debe definir la línea base, definir un escenario con proyecto y comparar el escenario con proyecto contra la línea base.

☞☞ **Permanencia:** Período de tiempo en el que el carbono permanecerá capturado.

☞☞ **Riesgos:** La probabilidad de reversión de la captura de carbono por causas naturales (incendios, pestes, inundaciones) o antropógenas no previstas.

☞☞ **Fugas:** Las emisiones de GEI que ocurren por fuera del área del proyecto, pero que son producto directo de las actividades del mismo.

☞☞ **Incertidumbres:** Falta de seguridad o certeza absoluta en el volumen de remoción de CO₂ realizada por un sumidero en un determinado período de tiempo.

(Oficina Argentina del Mecanismo para un Desarrollo Limpio, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable 2003).

Los suelos, el cambio de uso de los suelos y el Cambio Climático

Se ha estudiado el efecto del cambio de uso del suelo en el cambio climático, tanto a nivel global como nacional. A nivel global, se estima que el cambio del uso del suelo contribuye con un 12% al calentamiento global (Díaz 2000 en BBVA 2000) y, a nivel nacional, el cambio de uso del suelo aporta con un 66.6% en las emisiones domésticas totales de GEI (ACCEFYN 1990).

El cambio en el uso del suelo está relacionado con el cambio climático como un factor causal y como una forma de expresión del segundo. Las actividades de cambio de uso del suelo contribuyen al cambio climático y, el uso del suelo se puede ver afectado por el cambio climático, por lo tanto, unas adecuadas estrategias de uso del suelo podrían ayudar a mitigar éste fenómeno (Dale 1997).

Por otra parte, el carbono contenido en los suelos es el resultado de miles de años de Producción Primaria Neta (PPN). Sin embargo, existe una gran incertidumbre acerca de la cantidad total de carbono que se encuentra en forma de materia orgánica en todos los suelos del mundo. Los estudios de suelos sugieren que éstos acumulan 2 o 3 veces más carbono que la

vegetación en la mayoría de los biomas, salvo en los bosques húmedos ecuatoriales (Tabla No. 2), donde se observa unas altas tasas de descomposición de la materia orgánica (Asher 2001).

TABLA NO. 2 Estimaciones del contenido global de Carbono en la Vegetación y en Suelos de los principales biomas

BIOMA	AREA (10 ⁶ Km ²)	Contenido Global de Carbono (Gt C)		
		VEGETACIÓN	SUELOS	TOTAL
Bosques Ecuatoriales	17.6	212	216	428
Bosques Temperados	10.4	59	100	159
Bosques Boreales	13.7	88	471	559
Sabanas Ecuatoriales	22.5	66	264	330
Pastizales Temperados	12.5	9	295	304
Desiertos y Semidesiertos	30.0	8	191	199
Tundra	9.5	6	121	127
Humedales	3.5	15	225	240
Cultivos	16.0	3	128	131
Total	135.6	466	2011	2477

Fuente: Asher 2001

Como los suelos contienen alrededor de tres veces más reservas de carbono orgánico que la biomasa vegetal y animal sobre la tierra y el doble del carbono contenido en la atmósfera, la materia orgánica del suelo es potencialmente la más peligrosa fuente de CO₂ para el calentamiento global, aparte del proveniente de los combustibles fósiles. Indirectamente, el descenso en la producción agrícola y de biomasa resultante de la degradación de los suelos, también contribuye a un incremento del CO₂ atmosférico, por descenso en el secuestro de CO₂ en la fotosíntesis, y por obligar a incorporar nuevas tierras a la producción agrícola, generalmente a través de deforestaciones incontroladas y quemando la vegetación, especialmente en zonas ecuatoriales. Solamente un descenso anual de 0,15 % de C orgánico del suelo en todo el mundo, o un descenso del 5% en el C fijado por fotosíntesis, doblaría el incremento anual actual de CO₂ atmosférico (Sentis 1994).

También se ha estimado que el reservorio de carbono manejado por los granjeros en cultivos y pasturas de todo el mundo equivale al carbono

total que puede ser liberado a la atmósfera en 100 años de uso de combustibles fósiles a las tasas actuales mundiales (Agriculture and Agri-Food Canada. S.F.).

A continuación se ilustra la distribución del contenido de carbono en los suelos del mundo y especialmente de Suramérica. En éstos se puede observar las áreas con un contenido considerable de carbono en suelo, muchas de ellas zonas agrícolas. A una escala más detallada, nótese que en Suramérica los valores más altos de carbono (mayores a 280 toneladas métricas por hectárea) corresponden a las partes altas de la cordillera de los Andes, en donde se encuentran los Páramos. Estos datos coinciden plenamente con los datos de porcentajes de carbono orgánico en los suelos de Colombia, en donde los valores más altos corresponden a las partes altas de la cordillera de los Andes. (Mapa No. 3⁹).

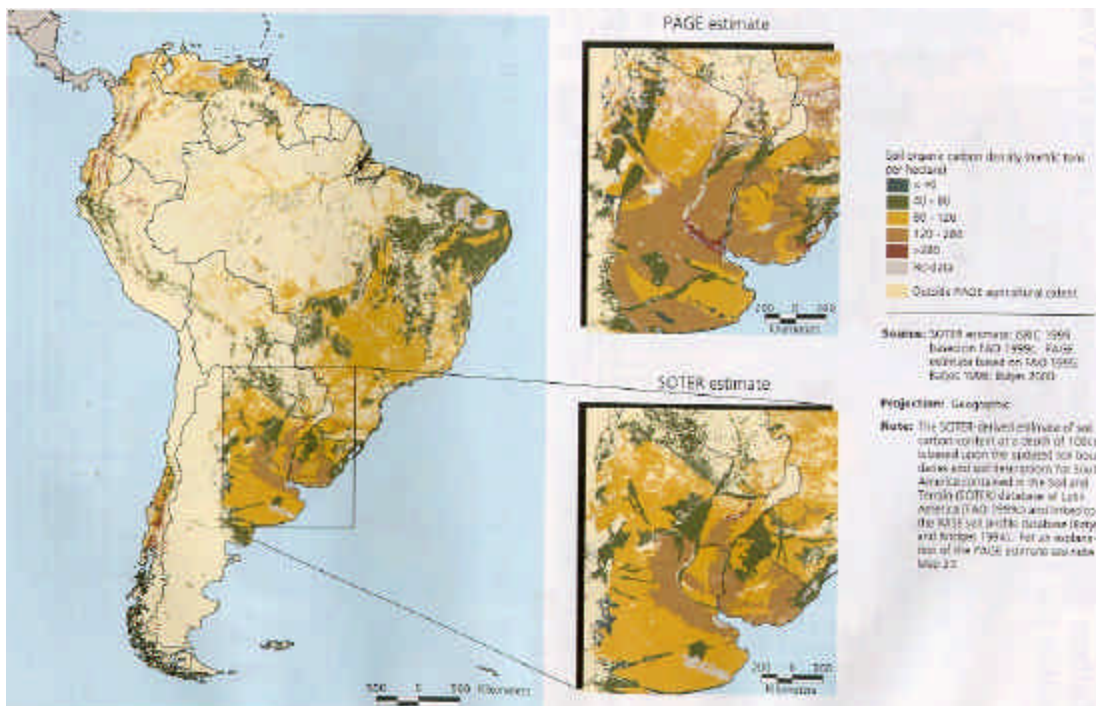
⁹ Obtenido a partir de la unión del mapa de ecosistemas de Colombia (IDEAM 2002) y de información sobre el contenido de carbono en los suelos colombianos (IGAC. S.F.).

MAPA NO. 1 Contenido de carbono en los suelos del mundo



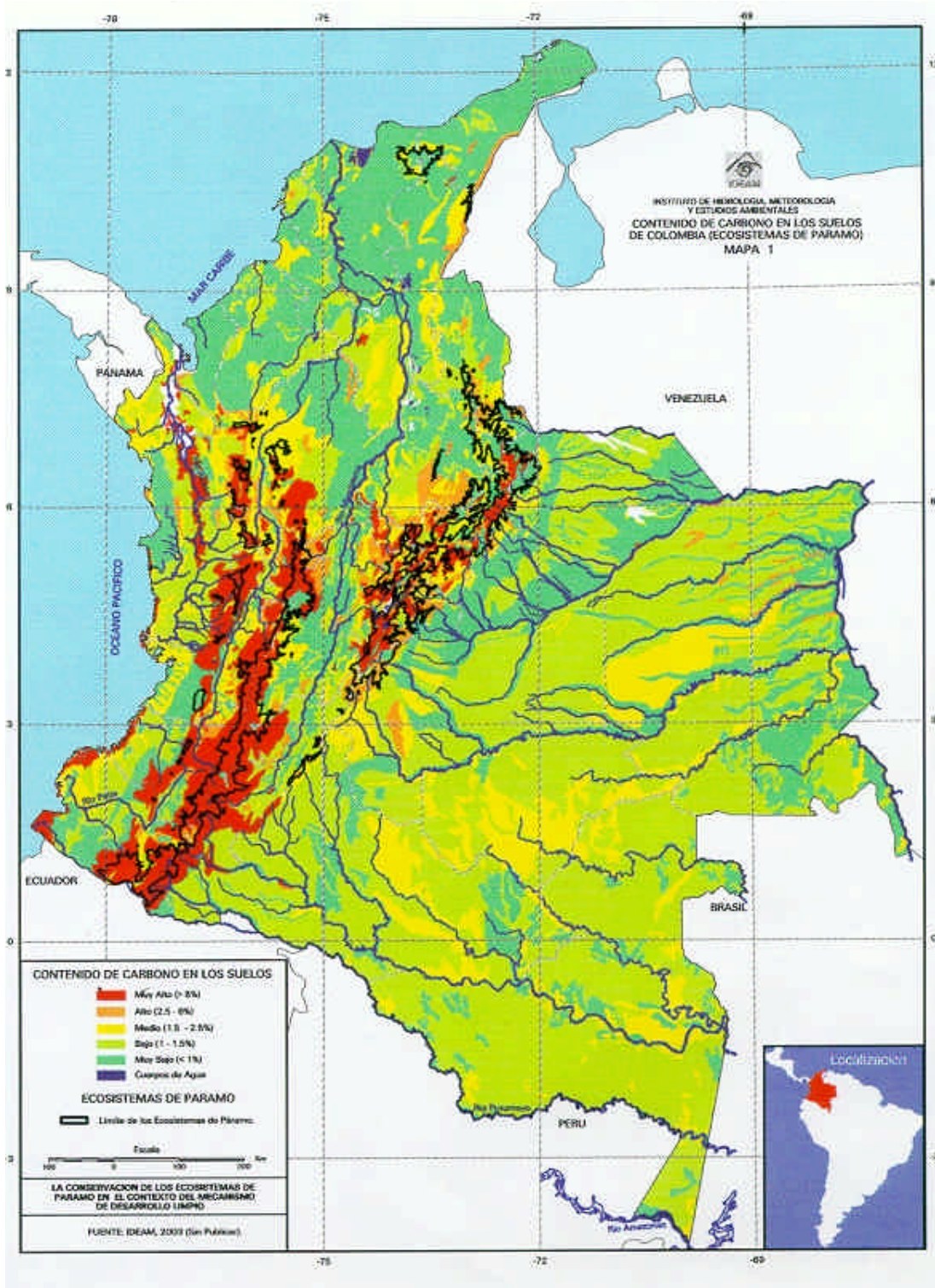
El contenido promedio de carbono en el suelo fue calculado a partir de más de 4000 horizontes individuales de 100 cm de profundidad, contenidos en la base de datos del inventario mundial de potenciales de emisión de suelos (WISE). Incluye áreas con más del 30% de actividad agrícola. Batjes 1996, Batjes 2000, FAO 1995, GLCCD 1998 y USGS EDC 1999. En: Stanley, *et al.* 2000 **Fuente:** Stanley, *et al.* 2000

MAPA NO. 2 Contenido de carbono en los suelos de Suramérica



Las estimaciones de carbono fueron realizadas con base en las descripciones actualizadas de la base de datos SOTER para América Latina. ISRIC 1999, Batjes 1996, Batjes 2000, FAO 1995, FAO 1999. En: Stanley, *et al.* 2000. **Fuente:** Stanley, *et al.* 2000

MAPA No. 3 Contenido de carbono en los suelos de Colombia



Efectos del Cambio Climático sobre los ecosistemas de páramo

Los resultados de estudios realizados por el IDEAM, indican que en un escenario de duplicación de CO₂ la temperatura aumentará entre 2.5 y 3°C y la precipitación se reducirá entre un 10 y 20%. El principal efecto potencial es el probable ascenso de las zonas bioclimáticas y sus límites hasta de unos 400 a 500 m, en un tiempo relativamente corto. Estas partes de las zonas de vida bioclimáticas (según Holdridge) que sufrirían la transición a otra zona, serían las más vulnerables. Es importante resaltar que estamos frente a la proximidad de una situación que no se ha presentado en por lo menos 700.000 años o más. (IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo 2002).

TABLA NO. 3 Desplazamientos en las Zonas de Vida de Holdridge ZVH en la alta montaña colombiana por un cambio climático 2xCO₂

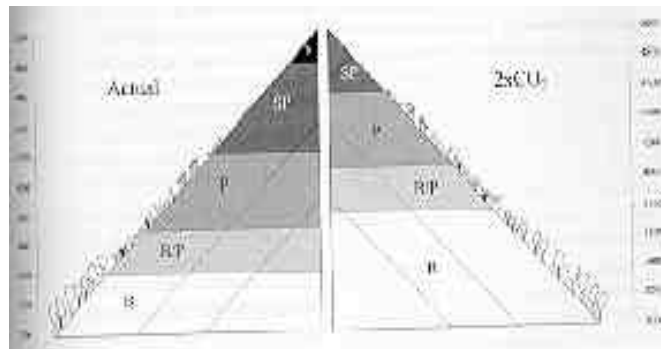
Zona de vida de Holdridge de Alta montaña	Equivalente Cuatrecasas	Área ZVH desplazada % total	
Matorral Desértico Montano	Subpáramo	69.14	47.60
Bosque Húmedo Montano		31.11	
Bosque muy húmedo montano		40.79	
Bosque pluvial montano		73.64	
Páramo subandino	Páramo	44.87	75.75
Páramo pluvial subalpino		76.47	
Tundra Pluvial Alpina	Superpáramo	85.20	85.20
Nieve	Nieve	94.48	94.48

Fuente: IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo 2002

La tabla 3 muestra un panorama bastante crítico en un posible incremento en las concentraciones de CO₂ atmosférico. Los desplazamientos de las zonas de vida, como ha sido expuesto anteriormente, tendrían un gran impacto en términos de la distribución y diversidad de las especies.

La localización de los ecosistemas de alta montaña hace que en ascensos asociados a un calentamiento, se genere una reducción del área y una disminución de la diversidad biológica que ellos albergan. Debido al avance en la vertical, el área del ecosistema se reduce y tiende a desaparecer, como se observa en la Figura 4. Esta localización particular en la alta montaña los hace vulnerables al cambio climático.

FIG. 4. Zonas bioclimáticas actuales y en escenario 2xCO₂



B= Bosque; **B/P**= Bosque Alto Andino; **P**= Páramo; **SP**= Superpáramo; **N**= Nival

Fuente: IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo 2002

En una eventual duplicación de las concentraciones de dióxido de carbono atmosférico, el ecosistema de páramo tenderá a desplazarse hacia arriba casi en su totalidad y se reduciría fuertemente, hasta una cuarta parte de su extensión actual. Es de esperar que varias especies tengan problemas para encontrar en el antiguo superpáramo su ambiente propio, zonal o azonal. Se puede esperar que especialmente las especies todas endémicas y frecuentemente de requerimientos ecológicos especiales, de los géneros *Espeletia* y *Espeletiopsis*, correrán peligro de extinción. Se puede indicar entonces, una fuerte reducción del área de las zonas bioclimáticas y su ascenso en unos 400 o 500 m en altitud, lo que causará muy probablemente una extinción masiva, no solo de las especies sino también del ecosistema (IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo 2002).

El cambio climático por calentamiento global, se presenta como un factor adicional de perturbación que entra a modificar sustancialmente los regímenes naturales y alterados de perturbación en los ecosistemas. En general, la adaptación de las especies al cambio climático dependerá no solo de su variabilidad genética, sino de su capacidad de migración y dispersión. Especies con altas tasas de propagación y colonización a distancia, serían las más favorecidas. Especies con tiempos generacionales altos y tasas de propagación y colonización de hábitats nuevos menores, serían mucho más vulnerables al cambio climático. Entre más rápida sea la tasa de ocurrencia del cambio climático, mayor será el riesgo de degradación. Por otro lado, los ecosistemas no responderían de una forma única al cambio climático. Cada especie responderá de manera diferente. Las asociaciones actuales entre las especies se pueden romper, y nuevas comunidades o formas de combinaciones de especies aparecerán. Tampoco todas las especies poseen la misma vulnerabilidad ante el Cambio Climático, algunas incluso se

verían beneficiadas, dado que mayores niveles de CO₂ podrían estimular la fotosíntesis en ciertas plantas; es el caso de las plantas C3, que suprimen su fotorespiración y hacen más eficientemente el metabolismo del agua a medida que se aumentan las concentraciones de CO₂ atmosférico. Dado que la gran mayoría de las plantas son tipo C3, se podría pensar que el cambio climático favorecerá la competitividad de estas especies sobre las C4, mientras que éstas se podrían ver muy afectadas. Muchos de los géneros que están presentes en los ecosistemas altoandinos, sólo presentan especies C3; sin embargo las pocas especies C4 podrían extinguirse completamente (IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo 2002).

Los ecosistemas de páramo como mitigadores del Cambio Climático

Como se documentó en las páginas anteriores, se ha estudiado más la vulnerabilidad de éstos ecosistemas ante el Cambio Climático, que la función como mitigadores del mismo. Los estudios que a éste respecto se han publicado, no son numerosos; sin embargo, el tema está cobrando vigencia, de modo que ésta función ha sido mencionada en trabajos como los de Hofstede 1999.

Éste autor ha documentado que el ecosistema de páramo, puede almacenar más carbono que la selva tropical si se considera el suelo, los datos por calculados por éste autor se expresan en la Tabla 4:

TABLA NO. 4 Comparación de ecosistemas de páramo y selva tropical en términos de la cantidad de carbono acumulada en los compartimentos suelo y vegetación.

Compartimento	ton C/ha ¹⁰	
	Páramo	Selva Tropical
Vegetación	20	250
Suelo	1700	50
Total	1720	300

Fuente: Modificado de Hofstede 1999

Las bajas temperaturas y otras características que se explican más adelante, hacen que el ecosistema de páramo tenga unas bajas tasas de mineralización y reciclaje de nutrientes, lo cual favorece una lenta pero continua absorción neta de CO₂ atmosférico que es acumulado como parte de la materia orgánica en sus suelos de características histosólicas. La alta capacidad de los suelos de páramo para retener agua, favorece la prevalencia de condiciones anaeróbicas durante largos períodos del año,

¹⁰ Si estos valores se multiplican por 3,6, se obtiene el valor en toneladas de CO₂.

especialmente en las zonas de relieve plano. En tales condiciones, los suelos bajo páramo son una pequeña fuente neta de metano (otro importante GEI). En condiciones naturales, el potencial de calentamiento global (PCT¹¹ o GWP) de los suelos de páramo está en equilibrio, o sea en conjunto un sumidero modesto para GEI. Por su parte, los suelos de pasturas compactadas presentan un mayor PCT que los suelos de bosque y páramo natural (Rondón, *et al.* 2002).

Estudios realizados por los mismos autores en el Páramo de las Ánimas (Cauca, Colombia), demuestran que los contenidos de carbono son muy altos en las capas superficiales del suelo (20-30%) y van decreciendo progresivamente hasta 3-5% a 1 m de profundidad. Las capas superficiales de suelos bajo cultivos presentan significativamente menores tenores de C y una tendencia a la migración de carbono a las capas más profundas donde se registran incrementos respecto a los suelos no intervenidos. Estos últimos presentan compactación, lo cual tiene efectos negativos importantes no solo sobre la retención de agua, sino que también dificultan notablemente la interpretación de los almacenamientos totales de carbono. Las elevadas cantidades totales de carbono en suelos bajo usos nativos (315-330 ton C/ha) evidencian la gran capacidad de acumulación de carbono de éstos suelos.

Los ecosistemas de páramo tienen características que son considerables en el ciclo del carbono global. Un buen número de páramos son turberas minerales que acumulan hasta en un metro y medio de sus negros suelos, las cenizas de erupciones volcánicas continuas¹².

El Ciclo del Carbono

La incorporación del carbono a la biosfera tiene lugar mediante fotosíntesis a partir del CO₂ presente en el aire o disuelto en el agua. Este proceso permite almacenarlo reducido como carbohidrato en la biomasa vegetal. Cualquier otro proceso biológico quimiosintético depende en última instancia del alimento vegetal logrado directa o indirectamente y originalmente producido gracias a la luz solar (salvo procesos como los que permiten la vida en los oscuros fondos oceánicos y otros ambientes extremos). El carbono fijado, en cualquier caso, puede ser oxidado a CO₂ por respiración, o capitalizarse en forma de estructuras ecológicas más o menos complejas que pueden removerse continuamente o persistir durante mucho tiempo (e.g. esqueletos, madera, humus, petróleo, etc.). A escala local, el ciclo del carbono puede

¹¹ El Potencial de Calentamiento de la Tierra (PCT) es el Índice que describe las características radiativas de los gases de efecto invernadero mezclados de forma homogénea, y que representa el efecto combinado de los distintos períodos de permanencia de estos gases en la atmósfera y su relativa eficacia en cuanto a absorber radiación infrarroja saliente. (IPCC. 2001a).

¹² Hofstede, Robert. 2003. Comunicación Personal

describirse, sencillamente como resultado de los procesos de fotosíntesis y respiración, con una inversión inicial de energía solar que globalmente apenas suele representar el 1% de la radiación recibida por unidad de superficie. No obstante, la cantidad de materia de origen orgánico que ha llegado a capitalizarse a lo largo de los siglos es enorme (hojarasca, madera, materia orgánica del suelo, carbón, gas, petróleo). Esta tendencia a la capitalización de carbono orgánico (en estado de reducción), donde la energía queda almacenada en enlaces químicos, es una característica de la biosfera. El tiempo de permanencia de los elementos químicos dentro de las estructuras biológicas de los ecosistemas depende del grado de desarrollo alcanzado por éstos con el paso del tiempo (Díaz 2000 en BBVA 2000).

El carbono que forma parte de la biomasa, representa una estructura de almacenaje de energía. No obstante, parece que con el transcurso de la evolución biológica la biosfera nunca ha tendido a alcanzar una máxima captación de energía solar, es decir, a aumentar la eficacia de la producción vegetal. Más bien la vida ha mostrado una tendencia a lograr largos tiempos de permanencia de la energía dentro de sus estructuras (madera, materia orgánica del suelo). Esta permanencia parece asociada al aumento de la complejidad de los ecosistemas, circunstancia que sí parece haber tenido lugar durante la evolución. En la componente biológica de los ecosistemas, la persistencia de los elementos químicos tiene lugar principalmente en sus formas químicas reducidas –carbohidratos, proteínas, grasas-, contrastando con la forma oxidada en que generalmente aparecen en el ambiente abiótico. Los hidrocarburos son una forma de almacenaje de energía química en un compartimento de almacenaje.

Millones de toneladas de carbono se acumulan anualmente en la biomasa subterránea que desarrollan gramíneas y leguminosas de ciertos pastizales ecuatoriales. Las estimaciones hechas sobre tal almacenaje rondan un balance global de 600 millones de toneladas al año, calculadas a partir de tasas de secuestro de carbono de 2,9 a 14,7 t/ha x año. Se trataría de la capitalización de carbono en ecosistemas realmente maduros y distróficos, a pesar de la escasa representación arbórea (Díaz 2000 en BBVA 2000).

En el ciclo sedimentario regional, donde la materia está sujeta a procesos de erosión, transporte y sedimentación a lo largo de gradientes geográficos, la persistencia de los elementos químicos dentro de estructuras biológicas depende del grado de madurez de los ecosistemas. Los bosques y matorrales de las montañas no solo constituyen una formidable barrera física para la erosión y pérdida de elementos por gravedad, sino que la persistencia de éstos elementos en su materia orgánica es muy considerable. Los mecanismos biológicos locales de renovación de los ciclos de los elementos tienen el carácter de evitar que la pérdida de materiales cuesta abajo supere la regeneración de éstos procedentes del sustrato y del aire. Puede decirse que la tendencia a la 'evitación de pérdidas' de elementos químicos es paralela a la de 'capitalización de estructuras

complejas de biomasa', característica de toda la biosfera y responsable de las acumulaciones actuales de combustibles fósiles. Esta evitación es tanto más eficaz cuanto mayor es la complejidad de los ecosistemas. Los de gran sencillez, como praderas y cultivos herbáceos, presentan altas tasas de renovación de su biomasa y por tanto un menor tiempo de permanencia de la materia dentro de sus estructuras biológicas. Además su estructura simple actúa negativamente como barrera para la erosión. Por el contrario, sistemas más complejos como los bosques, renuevan su biomasa lentamente, la persistencia de los elementos químicos alcanza tiempos muy largos (Díaz 2000 en BBVA 2000).

Por su parte, en los períodos geológicos de extensión y regresión de la biosfera, guardan relación con determinadas concentraciones de CO₂ atmosférico y con cambios de temperatura del planeta: los cambios de temperatura indican mecanismos de retroalimentación; un descenso de ésta implicaría al principio una subida de la concentración de CO₂ y viceversa. Cuando el enterramiento de materia orgánica es grande (formación de hidrocarburos), indicaría una alta productividad primaria, lo cual haría que la cantidad de CO₂ en la atmósfera fuera bajo (Díaz 2000 en BBVA 2000).

Éste ciclo entero, actúa como un gigantesco bucle de retroalimentación que contribuye a la regulación de la temperatura de la Tierra. A medida que el Sol aumenta su temperatura, se incrementa la productividad de las plantas y se estimula la acción de las bacterias, con lo que el proceso de erosión de las rocas se incrementa, lo que a su vez significa una mayor absorción del CO₂ de la atmósfera y el consecuente enfriamiento del planeta (Capra 1998).

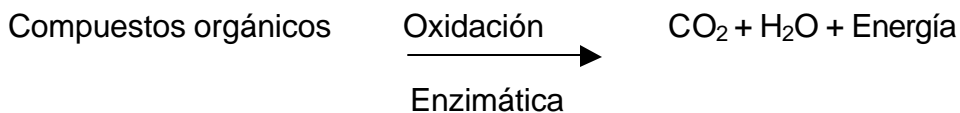
Los ecosistemas poco maduros, con valores pequeños de persistencia de los elementos, se caracterizan por un contenido grande y fluctuante de nutrientes en el medio externo (abiótico). Esto puede considerarse causado por demoras en las interacciones y transferencias energéticas entre unos organismos y otros (plantas, herbívoros, carnívoros, descomponedores), o también una consecuencia de interrupciones en el funcionamiento de una organización aún poco compleja, todavía deficiente en el transporte local de materia y energía. Por el contrario, en los sistemas más organizados, con una mayor persistencia de elementos químicos en estructuras biológicas, ocurre un determinismo mayor en las conexiones de unos tipos de organismos con otros. En los ecosistemas terrestres, al igual que en los marinos, la persistencia de los elementos químicos es más efectiva con la madurez, cuando aparecen estructuras difícilmente metabolizables, como por ejemplo la lignina o el humus del suelo como es el caso de los ecosistemas de páramo con muy bajas perturbaciones de origen antrópico. La relación carbono orgánico / nitrógeno aumenta generalmente con la sucesión (BBVA 2000).

El papel de la materia orgánica en el Ciclo del Carbono

Los compuestos de carbono que no son degradados después del ciclo de vida de los organismos, son transformados en materia orgánica. Durante éstas transformaciones, los microorganismos del suelo, utilizan una parte de la materia orgánica para obtener energía, en éste proceso, otra parte del carbono se libera en forma de CO₂. Una porción de la materia orgánica del suelo es convertida en compuestos estables resistentes a la degradación en de los microorganismos (Agriculture and Agri-Food Canada. S.F.)

La eficiencia con que la vegetación produce materia orgánica y su acumulación en el suelo está determinada por características del ambiente físico, principalmente por la temperatura. Este hecho hace que, en las distintas regiones climáticas del globo, la acumulación de materia orgánica edáfica transcurra a una velocidad diferente. Si se tiene en cuenta que la eficiencia de la descomposición de esa materia por la microfauna y microflora edáficas presenta cierto desfase térmico con respecto a la producción vegetal, se comprende que haya regiones en el globo donde el humus no llegue a acumularse, como es característico de los bosques ecuatoriales, y otras en que éste constituya la base fundamental de la estructura del suelo, como es el caso de los frágiles bosques mediterráneos (entre otros muchos). En unas y otras regiones, la destrucción del suelo por eliminación de bosques o mala gestión forestal constituye un grave problema tanto para el ciclo del carbono (la oxidación de éste y su rápida transferencia a la atmósfera) como del agua (la aceleración de la circulación de ésta por las laderas, siendo mayores las pérdidas por escorrentía y evaporación y menor la infiltración y percolación en el sustrato) (Díaz 2000 en BBVA 2000).

En el proceso de descomposición de la materia orgánica por los microorganismos del suelo, una parte del carbono es asimilado por ellos, se incorpora en el material celular, y otra parte se libera como CO₂, según la siguiente relación:



Los principales factores que afectan la tasa de descomposición de la materia orgánica del suelo son la temperatura, la humedad y el pH, dado que afectan de manera directa la actividad enzimática y el crecimiento microbiano. La descomposición de la materia orgánica se lleva a cabo a tasas más altas a medida que aumenta la temperatura hasta cierto límite. Este hecho explica el mayor contenido de materia orgánica en suelos de zonas altas de la franja ecuatorial, comparado con suelos en posiciones más bajas. El balance entre

los procesos de aporte de materia orgánica al suelo y mineralización está determinado en gran parte por la interacción de la temperatura y la humedad. Bajo condiciones aeróbicas no ocurre acumulación de materia orgánica a temperaturas superiores a 25°C, pues en ese rango el proceso de descomposición es más rápido que el de acumulación. En contraste, bajo condiciones anaeróbicas ocurre acumulación aún hasta temperaturas próximas a 40°C. En suelos pendientes a suavemente ondulados el ambiente tiende a ser anaeróbico en los sitios cóncavos, por lo cual allí se acumula más materia orgánica que en los sitios convexos donde el medio es predominantemente aeróbico (SCCS 1991).

Bendeck (1992) ha documentado que los constituyentes orgánicos del suelo se dividen en dos grandes grupos: los componentes vivos y los componentes no vivos. Los componentes vivos constituyen aproximadamente el 4% del carbono total del suelo y están conformados por: raíces de plantas (5-10%), macroorganismos (15-30%) y microorganismos (60-80%). Los componentes no vivos, cuyo contenido en carbono puede alcanzar hasta el 98% del total del suelo, se subdividen en: materia orgánica libre o fracción liviana¹³, con contenidos de carbono que varían ampliamente (1-40 %), constituida esencialmente por residuos de plantas en diferentes grados de descomposición; y humus, que generalmente se encuentra en la denominada fracción pesada o también llamada fracción estable. Por su parte, el mantillo o liter, que corresponde a la hojarasca, si bien es material vegetal y/o animal muerto, con poca o ninguna descomposición, no es un constituyente de la materia orgánica del suelo. Sin embargo, dada la importancia en el ciclo de nutrientes y en la formación del humus, la capa de mantillo es considerada como parte integral del perfil del suelo, por lo que de aquí en adelante, al hablar de suelo, se entenderá el mantillo más el suelo propiamente dicho, a menos que se haga explícita otra consideración.

La misma autora clasifica a la materia orgánica del suelo se en dos grupos: formas lábiles o de descomposición relativamente rápida y formas estables. El primer grupo incluye el mantillo (con la salvedad anteriormente comentada), la Materia Orgánica Libre (MOL), las formas vivas y las sustancias no húmicas. La fracción del carbono que pertenece a éste primer grupo es denominada Carbono Orgánico Libre (COL). Al grupo de las formas estables pertenecen las sustancias húmicas, con mayor o menor grado de interacción con la fracción mineral y un grupo de macromoléculas orgánicas, resistentes al ataque microbial. La fracción del carbono incluida en este segundo grupo es denominada carbono ligado a la fracción mineral (Carbono ligado a la F.M.). Cabe resaltar aquí que el C ligado a la F.M es el resultado de la evolución y mineralización del COL y que éste último únicamente se lo puede encontrar en las capas superficiales de los suelos

¹³ También llamada fracción lábil.

(primeros 20 cm), las capas profundas únicamente poseen C ligado a la F.M, por su estado de evolución.

Las formas estables de la materia orgánica son resistentes a la descomposición, por lo que tienen tiempos de duración que van de los 200 a los 1500 años (C.A.B. International 1989). En los ecosistemas ecuatoriales, el mantillo y la materia orgánica libre se descomponen rápidamente, por lo general en lapsos que van de meses a uno o dos años, mientras que en ecosistemas temperados el tiempo de reciclaje es mayor a un año, dependiendo de la composición química y las condiciones ambientales propias de cada ecosistema; así mismo, las pérdidas de materia orgánica ocurren más rápidamente en la franja intertropical, cuando el ecosistema es perturbado, que en zonas temperadas (Bendeck 1992).

Los estudios realizados sobre separación de estas fracciones no son numerosos. En Colombia cabe resaltar los estudios de Andreux y Correa. S.F. en los suelos de la sabana de Bogotá y los de Bendeck 1992 en los suelos del noroccidente del Caquetá. En ambos casos, la separación de las fracciones se realiza por clases de tamaño, desde las menores a 100 μm hasta las mayores a 2000 μm ¹⁴.

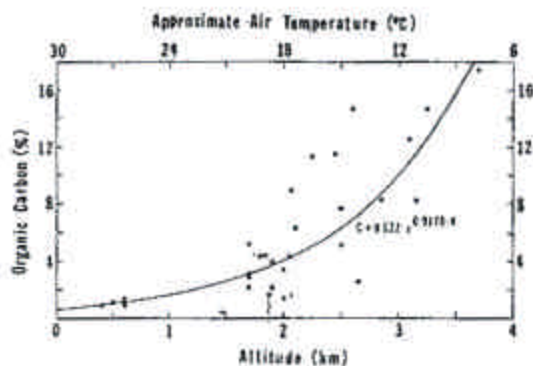
La misma autora documenta que el humus puede representar entre el 60 y el 90 % del carbono total del suelo, dataciones con C14 han mostrado tiempos de permanencia del humus de entre 250 y 3000 años. Este es un proceso en el ciclo del carbono en el que la escala temporal de es adecuada con la humana, por lo tanto se puede considerar éstos compuestos como de permanencia perpetua.

Aunque el propósito central de los estudios sobre el carbono contenido en los suelos de ecosistemas de páramo no ha sido la preocupación por el cambio climático, existe en el país cierta información sobre el contenido de materia orgánica en los suelos. Cabe destacar los estudios de Hofstede 1995 en el páramo del Parque Nacional Natural Los Nevados, quien hace una clasificación del carbono contenido en la vegetación, la necromasa, la biomasa radicular y el suelo. Pichot, *et al.* 1978, realizaron un estudio de la relación de la materia orgánica del suelo en relación con la altitud en el oriente de Cundinamarca e incluso llegaron a una ecuación en donde el contenido de carbono es una función exponencial de la altitud (Figura 5). Hay también numerosos estudios realizados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (e.g. IGAC 1985 e IGAC 2000), en donde el contenido de carbono en el suelo de muchas áreas de páramos en el país es expresado al igual que otras propiedades físico-químicas de los mismos. Algunos de los

¹⁴ Todas las fracciones menores a 100 μm corresponden a fracciones estables de carbono y las mayores a 100 μm a las fracciones lábiles.

resultados de estudios consultados sobre el contenido de carbono en suelos de páramo colombiano se relacionan en la Tabla 5.

FIG. 5. Porcentajes de carbono orgánico en la superficie de los suelos (0-20 cm) del área Medina – Río Guavio en el oriente de Cundinamarca



Fuente: Pichot, *et al.* 1978

TABLA NO. 5 Resultados de estudios sobre el contenido de carbono en suelos de páramo conservados en Colombia y sus variables climáticas.

Autores	Área de estudio	Valor mayor de % de C en suelo	Valor menor de % de C en suelo	Promedio de % de C en suelo	Temperatura promedio multianual* °C	Precipitación promedio mensual* mm
Díaz y Paz 2002	Páramo de Las Animas			36,25	13.9	177.3
Díaz y Paz 2002	Páramo de Piedra León			26,10	13.9	150.7
Hofstede 1995	Páramo de Agua Leche	24.8	6.6	11,54	6.0	99.1
IDEAM 2003	Páramo de Rabanal			18,90	13.8	58.6
IGAC 1988 **	Páramo de Chingaza			27,55	13.2	63.4
Sturm y Rangel 1985***		4.9	29.2	17,05		
Bekker y Cleef 1985***	Páramo de Laguna Verde	11.3	34.6	22,95		
Thouret 1989***	Páramo de Los Nevados	7.43	22.47	14,95	6.0	99.1
Tol y Cleef 1992***	Páramo de Chingaza			34.6	13.2	63.4

* Datos tomados y modificados de las estaciones climatológicas del IDEAM

** Se tomó el dato de los primeros 20 cm del suelo de la consociación Chingaza.

*** Citados en Díaz y Paz 2002 por Hofstede 1995

El ciclo global del carbono y los ecosistemas de páramo

En el ciclo del carbono global, los volcanes de la Tierra han estado enviando cantidades ingentes de dióxido de carbono a la atmósfera durante millones de años. El exceso de CO₂ atmosférico es absorbido y reciclado en un extenso bucle de retroalimentación que incluye la erosión de las rocas como elemento clave, dado que los intercambios entre los organismos, mediante los procesos de respiración, fotosíntesis y descomposición se mantienen en equilibrio y no afectan el nivel de CO₂ en la atmósfera.

En el proceso de erosión de las rocas, éstas se combinan con el agua de lluvia y con el CO₂ para formar diversos compuestos químicos, llamados carbonatos. El CO₂ es pues, retirado de la atmósfera y disuelto en soluciones líquidas. Éstos son procesos puramente químicos, que no requieren la participación de organismos vivos. No obstante, la presencia de bacterias en el suelo incrementa ampliamente el nivel de erosión. Los carbonatos son luego arrastrados a los océanos donde unas minúsculas algas, entre otros organismos marinos, los absorben para construir sus delicadas cáscaras de carbonato de calcio (CaCO₃). Así, el CO₂ que estaba en la atmósfera acaba convertido en cáscaras de CaCO₃ de algas, quienes absorben directamente el CO₂ del aire. Cuando estas algas mueren, sus cáscaras se precipitan al fondo de los océanos, donde forman sedimentos masivos de piedra caliza (otra forma de CaCO₃). Debido a su enorme peso, éstos sedimentos de caliza se hunden gradualmente en el manto terrestre donde se funden, llegando incluso a desencadenar los movimientos de las placas tectónicas. En realidad, parte del carbono contenido en las rocas fundidas, será reenviado a la atmósfera por los volcanes en forma de CO₂ para iniciar otra vuelta en el ciclo del carbono. Es en éste punto donde la fracción mineral del carbono del suelo puede ser emitida nuevamente a la atmósfera (Capra 1998). Lo anterior constituye un argumento esencial para conservar los páramos; si se destruye la estructura de éste ecosistema, aparte de lo que ocurre con las fracciones lábiles, el carbono ligado a la F.M. (estable) en gran parte se lava y a través de los cuerpos de agua es transportado a los océanos en donde junto con todos los demás sedimentos provenientes de la materia orgánica de los demás ecosistemas tanto marinos como terrestres se funde y, puede ser nuevamente liberado tal como se describe en el proceso anterior. Por lo tanto no conservar ecosistemas como los páramos también es acortar la duración de las fracciones estables de carbono.

Existen actualmente incertidumbres acerca de la captura neta de CO₂, dado que éste ecosistema no ha sido estudiado en forma dinámica en el tiempo. Probablemente éste ecosistema fije carbono en una forma neta dado que el resultado de la producción primaria neta que no se pierde por la respiración pasa a constituir la materia orgánica del suelo y, dado que las tasas de descomposición de éste ecosistema son tan bajas hay una acumulación neta de carbono que se mineraliza muy lentamente pasando a formar parte del

humus, el cual es constituido de carbono ligado que no será susceptible de ser liberado en forma de CO₂.¹⁵, al menos en escalas de tiempo humanas (Agriculture and Agri-Food Canada. S.F.). Pero el páramo no sería el único ecosistema ecuatorial con características de fijación neta en el tiempo. Como se vio en capítulos anteriores, estudios realizados en la franja ecuatorial demuestran que estos ecosistemas son capaces de fijar carbono en forma neta incluso después de su madurez.

¹⁵ Bendeck, Myriam. 2003. Comunicación Personal

MARCO TEÓRICO:

El presente estudio se enmarca en teorías fundamentales que están bastante documentadas y presentan hasta ahora un alto grado de certidumbre:

- ☞☞ El aumento en los niveles de CO₂ atmosférico hace que la radiación solar penetre y no pueda salir libremente de la atmósfera (Efecto invernadero). Arrhenius y Chamberlin en BBVA (2000).
- ☞☞ Existen sistemas capaces de fijar y retener CO₂ como son los bosques y los Océanos. (Compartimientos o sumideros de carbono). A.N. y A.H. Strahler en BBVA (2000).
- ☞☞ Las actividades humanas asociadas al desarrollo económico, la utilización de los combustibles fósiles como fuente de energía dominante y el crecimiento demográfico mundial, han modificado la composición natural de la atmósfera, al aumentar las concentraciones de gases de efecto invernadero. IPCC. (United Nations 1992).
- ☞☞ El hombre es un agente de regresión de los ecosistemas naturales: simplificación, menor madurez y tasa de renovación de nutrientes más rápida. (Margalef 1992).
- ☞☞ Los ecosistemas cambian en función del tiempo (Margalef 1992).
- ☞☞ Los cambios de los ecosistemas en el tiempo se pueden dar por causas externas (Sucesiones alogénicas) (Odum. 1980).
- ☞☞ Los ambientes estables posibilitan la sucesión hasta ecosistemas clímax, mientras que los ambientes fluctuantes dificultan la sucesión hasta ecosistemas clímax (Margalef 1992).
- ☞☞ Todo ecosistema se sustenta en un ciclo de materia y en un flujo de energía (Margalef 1992).
- ☞☞ La estructura de un ecosistema en un momento dado, es un proceso resultante de los cambios históricos del ambiente, de la cantidad y calidad de materia y energía y de la competencia (Margalef 1992).
- ☞☞ La Ecología debe estudiarse desde la concepción de sistemas abiertos (Margalef 1992).

☞ La mayor parte de la naturaleza es tan complicada, que el lenguaje geométrico – lineal¹⁶ resulta inadecuado. Mandelbrot, B (Capra 1998).

☞ Los modelos climáticos son la mejor herramienta disponible hoy en día para simular la respuesta del sistema climático global a los cambios en la composición de la atmósfera. Moguer, M en BBVA (2000) .

MARCO CONCEPTUAL:

Los conceptos más utilizados en ésta investigación (**negrita**), son explicados a continuación y la mayoría han sido tomados en su forma textual del Tercer informe de evaluación del Cambio Climático (IPCC. 2001a), a menos que se encuentre otra cita. Algunos conceptos han sido ya explicados en capítulos anteriores¹⁷ por lo que no se los incluye.

El **Cambio Climático** se define como una variación estadísticamente significativa, ya sea de las condiciones climáticas medias o de su variabilidad, que se mantiene durante un período prolongado (generalmente durante decenios o por más tiempo). El cambio del clima puede deberse a procesos naturales internos o a un forzamiento externo, o a cambios antropógenos duraderos en la composición de la atmósfera o en el uso de la tierra (IPCC 2001a). Sin embargo, cabe resaltar que la Convención Marco sobre el Cambio Climático, define el cambio climático como una alteración de los patrones climáticos que se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana, que modifica la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (United Nations 1992).

El **sistema climático** es un sistema altamente complejo integrado por cinco grandes componentes: la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la superficie terrestre y la biosfera, y las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona con el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna y debido a forzamientos externos como las erupciones volcánicas, las variaciones solares y los forzamientos inducidos por el ser humano, como los cambios en la composición de la atmósfera y los cambios en el uso de la tierra.

¹⁶ Se dice que un proceso es “no lineal” cuando no hay ninguna relación proporcional simple entre causa y efecto. El sistema climático tiene muchos de estos procesos no lineales, que hacen que el comportamiento del sistema sea potencialmente muy complejo. Esta complejidad puede dar lugar a cambios climáticos rápidos (IPCC. 2001a).

¹⁷ Véase la Introducción y los Antecedentes.

Los **gases de efecto invernadero** o gases de invernadero (GEI) son los componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. Esta propiedad produce el efecto invernadero. En la atmósfera de la Tierra, los principales gases de efecto invernadero (GEI) son el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃). Hay además en la atmósfera una serie de (GEI) creados íntegramente por el ser humano, como los halocarbonos y otras sustancias con contenido de cloro y bromo, regulados por el Protocolo de Montreal. Además del CO₂, el N₂O y el CH₄, el Protocolo de Kyoto establece normas respecto de otros gases de invernadero, a saber, el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC).

El **Dióxido de carbono (CO₂)** es el gas presente espontáneamente en la naturaleza, que se crea también como consecuencia de la quema de combustibles de origen fósil (e.g. el petróleo, el gas y el carbón.) y biomasa, así como de cambios en el uso de la tierra y otros procesos industriales. Es el principal gas de efecto invernadero antropógeno que afecta al balance radiativo de la Tierra. Es el gas que se toma como marco de referencia para medir otros gases de efecto invernadero, y por lo tanto su Potencial de calentamiento de la Tierra (PCT) es 1.

Se considera **sumidero**, cualquier proceso, actividad o mecanismo que elimine de la atmósfera un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de los mismos.

Los **compartimentos** en los que se encuentra el carbono de la Tierra han sido denominados como “**activos**” y “**de almacenaje**”, refiriéndose a que el elemento se encuentre, respectivamente, accesible los procesos biológicos (fotosíntesis, descomposición, etc.) o solamente a los físico-químicos (erosión, sedimentación, etc.). La persistencia del carbono puede variar desde unos segundos o unos pocos centenares de años, si se contemplan ecosistemas actuales, hasta millones de años si se tienen en cuenta los combustibles fósiles almacenados en la corteza terrestre por ecosistemas ya extinguidos. (Balairón 2000 en BBVA 2000). La Tabla 6 muestra las cantidades de carbono contenidas en los diferentes compartimentos.

TABLA NO. 6 Contenido de Carbono en compartimentos activos y de almacenaje de la Tierra.

COMPARTIMENTO	CARBONO Gt (1 Gt = 10 ⁹ t)	PORCENTAJE DEL TOTAL %
COMPARTIMENTOS ACTIVOS		
Capas profundas de los océanos	38'000.000	65,497
Materia orgánica en descomposición (océanos)	3.000	0,005
Materia orgánica en descomposición (continentes)	3.000	0,005
Biomasa (continentes)	827	0,001
Atmósfera	700	0,001
Capas superficiales de los océanos	516	8,89 * 10 ⁻⁴
Biomasa océanos	2	3,45 * 10 ⁻⁶
Subtotal comp. activos	38'008.045	65,510
COMPARTIMENTOS DE ALMACENAJE		
Sedimentos carbonatados:	20'000.000	34,472
Combustibles fósiles:	9.960	0,017
Subtotal comp. almacenaje	20'009.960	34,489
TOTAL	58'018.005	100

Fuente: BBVA 2000

El **uso de la tierra o uso del suelo**, es definido como un conjunto de métodos, actividades e insumos humanos aplicados en un determinado tipo de cubierta del suelo, así como los fines sociales y económicos con los que se utiliza la tierra (por ejemplo, el pastoreo, la extracción de madera y la conservación).

Los **ecosistemas** son sistemas de organismos vivos que interactúan entre sí y con su entorno físico, que también es parte del sistema. Los límites de lo que podría llamarse un ecosistema son algo arbitrarios, y dependen del centro de interés o del objeto principal del estudio. En consecuencia, la extensión de un ecosistema puede abarcar desde escalas espaciales muy pequeñas hasta, por último, toda la Tierra.

La ganancia o pérdida neta de carbono de un ecosistema se denomina

producción neta del ecosistema, que es igual a la producción primaria neta menos el carbono perdido en virtud de la respiración heterotrófica. Por su parte, la producción primaria neta se define como el aumento de la biomasa vegetal o del carbono existentes en un elemento unitario de un territorio y que es igual a la producción primaria bruta menos el carbono perdido en virtud de la respiración autotrófica. La producción primaria bruta es la cantidad de carbono fijado desde la atmósfera en virtud de la fotosíntesis.

Según IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2002), el **páramo** se define como el ecosistema andino que se encuentra entre los 3600 y 4250 m.s.n.m., pudiendo fluctuar considerablemente su altitud según la situación geográfica-climática y según la cordillera. Se encuentra en Colombia principalmente en la cordillera Oriental, en la Sierra Nevada de Santa Marta, en la cordillera Central y Occidental. Se encuentra entre el subpáramo o a veces el bosque alto andino y el superpáramo, con una vegetación predominantemente abierta de gramíneas, frailejones (*Espeletia*) y, algunas formaciones arbustivas bajas de Colorado (*Polylepis*), Rodamonte (*Escallonia*) y otras. Entre los más importantes tipos de vegetación en los páramos, se reconocen los pajonales, Patizales, Frailejonales, Chuscales, Chitales y la vegetación presente en Turberas.

En éste ecosistema es característico un ambiente frío y húmedo con cambios repentinos en el estado del tiempo y unas fluctuaciones diurnas de temperaturas a nivel del suelo desde bajo 0°C hasta 23°C, conllevando a un ciclo de heladas y deshielos. Los días son usualmente fríos y ocasionalmente venteados, con lluvias frecuente y lloviznas la mayoría del tiempo. El páramo es un ecosistema frío y húmedo que presenta durante el día cambios de temperatura y nubosidad muy grandes y bruscos, pasando rápidamente de períodos de calor a otros de frío; la temperatura media es de 10,2°C con oscilación entre 3,1°C y 17,3°C. La humedad atmosférica relacionada con la temperatura, presenta también oscilaciones, el promedio es 85% pero puede presentar valores muy bajos. La evaporación es de 80,1 mm mensuales en promedio. Las precipitaciones pueden oscilar entre 130 mm hasta 3000 mm (Prieto 2002). El páramo presenta una estacionalidad diaria (verano en el día e invierno en la noche) y una delgada capa de atmósfera que determina una alta radiación ultravioleta (IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo 2002).

Hay una diferencia considerable entre vertientes relativamente secas y húmedas, que se expresa desde el subpáramo en primer lugar por la dominancia de *Calamagrostis* (más seco) y de *Chusquea* (más húmedo). Ésta diferencia sigue muy notoria en el páramo propiamente dicho, donde es fácil diferenciar páramo de pasto de macollas y páramos de bambúes. Además, en los páramos secos hay especies de *Espeletiopsis* y *Espeletia*, en los más húmedos solo de *Espeletia*. En general se observa que la

influencia humana es mucho más marcada en los páramos secos y menor en los páramos húmedos. Algunos de los mejor conservados se encuentran en áreas muy húmedas, como Tatamá Cordillera Occidental y Patascoy en el suroccidente del país. Los más afectados se encuentran en inmediaciones del altiplano Cundiboyacense, y en parte de la Cordillera Central.

El pastoreo tiene efectos profundos en la estructura y funcionamiento de los páramos. Sus efectos son notorios en la relación entre la distribución de la biomasa epigea y la biomasa hipogea, la fisionomía de las plantas y la ocurrencia del mismo fuego. A pesar de la gran influencia humana en los páramos, la cobertura en general es dominada por flora nativa. Existen enclaves de tipo azonal, como comunidades que se encuentran en suelos saturados de aguas, turberas y lagunas. (IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo 2002). Los paisajes conservados de los ecosistemas de páramo serán aquellos que presenten un bajo régimen de disturbios de origen antrópico.

Los suelos de los ecosistemas de páramo, tienen un bajo nivel de resiliencia por lo que son considerados muy frágiles. Éstos suelos son susceptibles a la pérdida de materiales por erosión (especialmente en vertientes no estables o desestabilizadas por el hombre) y, poseen una gran adición de materiales orgánicos que configura unos horizontes oscuros y profundos, úmbricos, hísticos o melánicos, si hay estabilidad superficial, si no la hay predominan los ócricos. En zonas depresionales se forman los Histosoles (Malagón 2002).

Algunos de los suelos presentes en los páramos son: Inceptisoles, suelos jóvenes, pobremente desarrollados que incluyen plaquaquepts crumbrepts y cryaquepts. Los andosoles, suelos con cenizas volcánicas y, los histosoles o suelos de pantano con una capa gruesa de humus (Rangel 2000).

MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN:

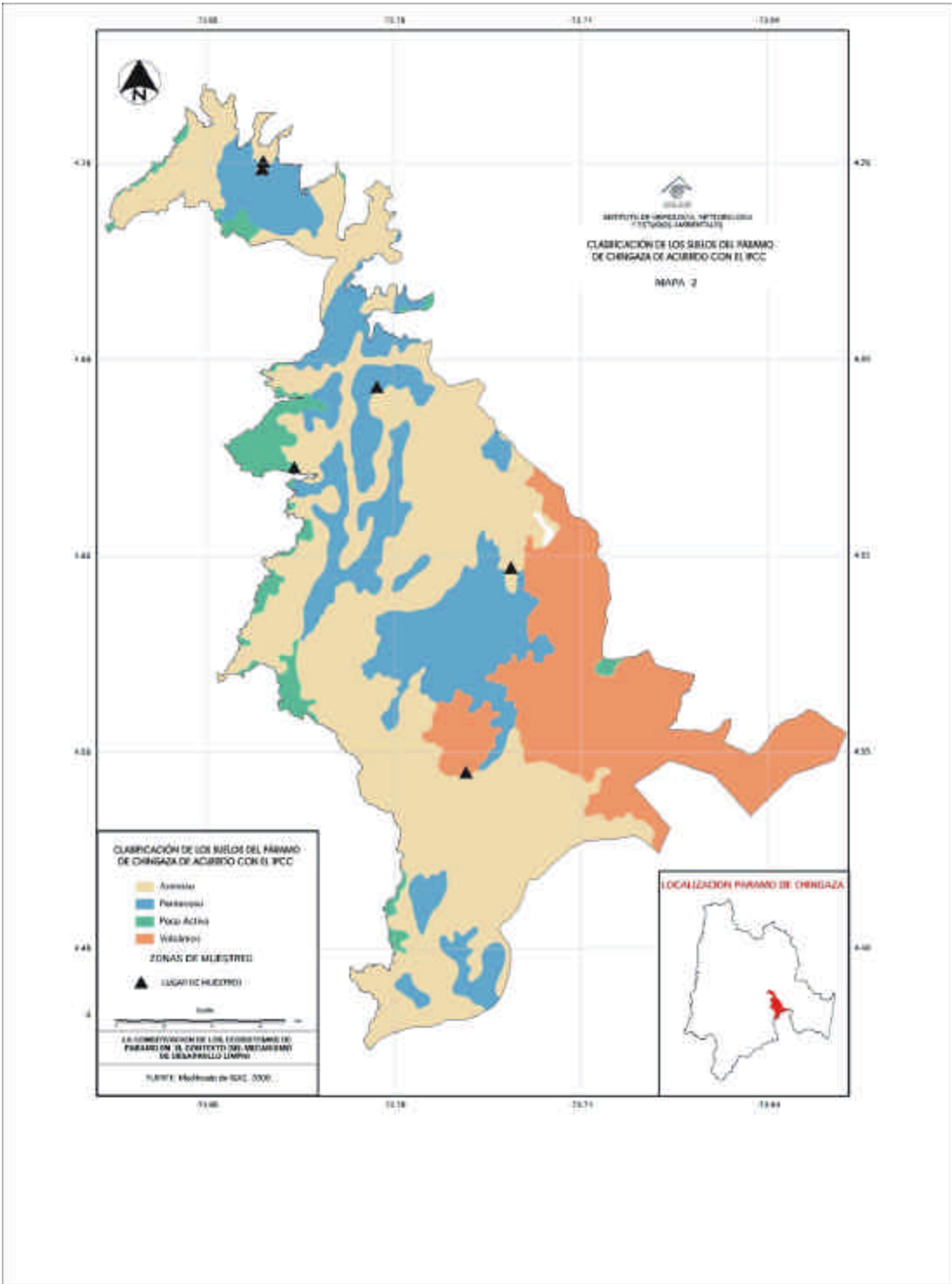
Según (IPCC 2000), la identificación, seguimiento y notificación de las tierras puede realizarse mediante información geográfica y estadística. Las variaciones del carbono almacenado y de las emisiones netas de gases de efecto invernadero a lo largo del tiempo pueden estimarse mediante una combinación de mediciones directas, datos sobre las actividades, y modelos basados en principios aceptados de análisis estadístico, inventarios de bosques, técnicas de teledetección, mediciones de flujo, muestreo de suelos. Acorde con el IPCC, para la producción de información primaria, en ésta investigación se utilizaron principalmente mediciones directas, muestreos de suelos e información geográfica.

FASE DE CAMPO:

Se seleccionaron 6 áreas de estudio ubicadas en las tres cuencas que componen el sistema Chingaza, a saber, cuenca del Río Guavio, cuenca del río Blanco y cuenca del río Chuza; la primera pertenece a la gran cuenca del Río Magdalena y las dos últimas a la cuenca del Río Orinoco. Los criterios de selección de dichas áreas, corresponden a los tipos de suelo recomendados por la metodología de cambio de uso del suelo y silvicultura del IPCC 1996, (Tabla 7 y Mapa 4). La información utilizada para la selección de las áreas, se basó en el Estudio General de Suelos del Departamento de Cundinamarca (IGAC 2000). Las muestras y réplicas puntuales en cada una de las áreas fueron seleccionadas al azar. Cabe resaltar que la totalidad de las áreas corresponden a áreas protegidas y por lo tanto con un nivel muy bajo de intervención antrópica.

La metodología para llevar a cabo los muestreos en cada una de las áreas de estudio, se basó fundamentalmente en C.A.B. International (1989) y Sevink & Lips (1987). Los segundos autores recomiendan que para cada muestreo sea necesario un mínimo de tres réplicas en el caso del suelo y cinco en el caso del mantillo. Sin embargo, Klinka *et. al* (1981) afirman que para que un muestreo de suelos sea representativo se deben tomar 10 muestras por hectárea, por lo que se debe tener especial cuidado con los datos extrapolados para cada área de estudio, dado que bien pueden no ser representativos. En éste estudio existen 6 áreas de estudio que corresponden a 4 tipos de suelo según IPCC (Mapa No. 4), por lo que los tipos de suelo Arenosos y Poco activos tienen 2 muestras (con el ánimo de comparar vertientes húmedas y secas). La categoría de suelos muy activos como tal, no fue encontrada para el páramo de Chingaza. Por su parte, se complementó la información del mapa de áreas protegidas de la UAESPNN correspondiente al Parque Nacional Natural Chingaza con el mapa de ecosistemas de páramo del IDEAM, para obtener el mapa del área de estudio (Mapa 4).

MAPA No. 4 Clasificación de los suelos de páramo de acuerdo con el IPCC y ubicación de los sitios muestreados.



Muestras de mantillo:

Por cada área de estudio, se tomaron 5 muestras de mantillo, separadas por al menos un metro de distancia, en las que se recolectó todo el material orgánico contenido en un cuadrante de 20 x 20 cm, como se ilustra en la siguiente figura:

FIG. 6. Toma de muestras de mantillo



Cada muestra fue pesada en campo.

Muestras de suelo:

Se tomaron 3 muestras de suelo mineral de 20 cm de profundidad¹⁸ y de un ancho de 10 x 10 cm, como se ilustra en la siguiente figura:

¹⁸ Los 20 primeros centímetros del suelo son los que se ven drásticamente afectados al introducir actividades de carácter antrópico en un área conservada y es en esa profundidad donde se encuentra mayormente la Materia Orgánica Libre M.O.L. Bendeck, Myriam. 2003. Comunicación Personal.

FIG. 7. Toma de muestras de suelo mineral



Cada muestra fue pesada en campo.

Todos los muestreos, fueron llevados a cabo en el ecosistema de páramo propiamente dicho y, la gran mayoría en presencia de vegetación de frailejonal – pajonal (Figura 8), como se relaciona en la Tabla No. 8. Uno de los criterios utilizados para elegir los lugares de toma de muestras dentro de las áreas fue la accesibilidad. Se tomaron muestras indistintamente en diferentes geoformas.

FIG. 8. Ejemplos de áreas de muestreo

Área Laguna de Chingaza



Área Laguna Seca



TABLA NO. 7 Información básica correspondiente a las áreas de estudio.

Área de estudio	Vertiente	Tipo de suelo ¹⁹	Unidad de suelo (IGAC)	Taxonomía
1	Barlovento Húmeda	Volcánico	MGIf	Asociación Typic Hapludands Humic Lithic Dystrudepts
2		Arenoso	MGTd	Asociación Typic Hapludands Pachic Melanudands Humic Lithic Dystrudepts
3		Pantanosos	MEAd	Asociación Typic Dystrocryepts Typic Cryaquepts
4		Poco activo	MGFf	Asociación Humic Dystrudepts Andic Dystrudepts Humic Lithic Dystrudepts
5	Sotavento Seca	Arenoso	MEFg	Complejo Typic Dystrocryepts Humic Dystrocryepts
6		Poco activo	MEFg	Complejo Typic Dystrocryepts Humic Dystrocryepts

FASE DE LABORATORIO:

Todos los análisis químicos se realizaron en Laboratorios Agrilab Ltda. La mayor parte de los protocolos de laboratorio utilizados en ésta investigación se encuentran suficientemente documentados en IGAC 1990 por lo que solo se explicaran algunas generalidades de los métodos utilizados.

Después de haber colectado todas las muestras, se procedió a secarlas al aire libre, durante dos semanas, tal como lo recomienda la metodología en Sevink & Lips 1987; las muestras de mantillo fueron llevadas a estufa a una

¹⁹ Establecido de acuerdo con IPCC 1996 e IGAC 2000

temperatura de 60°C durante 48-72 horas. Por su parte las muestras de suelo mineral, únicamente necesitaron secado al aire libre.

Una vez completamente secas todas las muestras, fueron pesadas, molidas, tamizadas y nuevamente molidas con el fin de evitar pérdidas de material, hasta llegar a fracciones de un tamaño de 2 mm.

La determinación de carbono orgánico tanto para las muestras de suelo como las de mantillo, se realizó por los métodos de Walckley-Black y colorimétrico (IGAC 1990).

Se realizó también una separación y cuantificación de la materia orgánica libre (fracción liviana) y de la materia orgánica humificada (fracción pesada) por el método granulométrico. Posteriormente, a la fracción liviana se le determinó el contenido de carbono orgánico por Walckley-Black.

ANÁLISIS DE DATOS:

Una vez obtenidos los datos de suelo, mantillo y materia orgánica libre, se procedió a estandarizar todos los resultados de laboratorio a campo, teniendo en cuenta su peso inicial y final y determinando su porcentaje de humedad. Los datos obtenidos se expresaron como concentración de carbono en suelo húmedo en campo. Los resultados de concentración de carbono en materia orgánica libre se convirtieron para ser expresados como concentración de carbono orgánico libre en suelo húmedo en campo. Se calcularon las distribuciones porcentuales de cada uno de éstos compartimentos por área (Anexo 5). Para la expresión de los datos de porcentaje de Carbono total y Carbono orgánico libre en suelo por área de estudio, se promediaron los valores de las tres réplicas de cada una de las áreas. Lo propio se realizó para las 5 réplicas de mantillo de cada área.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA:

A través de los programas Arcview 3.2, Arcinfo estación y Erdas 8.4 se obtuvo el Mapa No. 3, a partir de la unión del mapa de ecosistemas de Colombia (IDEAM 2002) y de información sobre el contenido de carbono en los suelos colombianos (IGAC. S.F.). Esta información permitió tener una aproximación acerca de los rangos en el contenido de carbono por área en todos los suelos colombianos y específicamente en los páramos. La distribución porcentual de estos rangos se ilustra en las Figuras 17 y 18.

Con base en la información del estudio de suelos de Cundinamarca (IGAC 2000), se definieron las unidades de suelo de acuerdo con la metodología del IPCC 1966; como resultado se construyó el mapa No. 4, en el que se

ubicaron los sitios de muestreo. Posteriormente, se calcularon las áreas por cada unidad de suelo con el fin de poder extrapolar los datos de carbono a todo el Páramo de Chingaza. Para realizar éste cálculo fue necesario digitalizar el mapa de suelos del área.

Se realizó el cálculo²⁰ del contenido total de carbono en suelo a 20 cm de profundidad por cada tipo de suelo según IPCC en el páramo de Chingaza. Para realizar éste cálculo se tomaron en cuenta los porcentajes de carbono en suelo en campo, la profundidad a la que fueron tomadas las muestras, el área y la densidad aparente del suelo, la cual se obtuvo a partir de IGAC 2000. Para el cálculo del contenido total de carbono en el mantillo, se tomaron los porcentajes de carbono, la profundidad promedio observada en campo, el área y, dado que no se encuentran datos de la densidad aparente del mantillo, se asumió un valor aproximado²¹ de 0.3 g/cm^3 para todas las muestras, (Anexo 5). La extrapolación de los datos de carbono por tipos de suelo fue posible gracias a su taxonomía, características pedogenéticas y morfológicas en cada una de las áreas de estudio. Lo anterior fue tomado del estudio de suelos de Cundinamarca IGAC 2000.

Con el fin de estimar el carbono contenido en los suelos de páramo colombianos, se recopilaron los datos de los estudios mencionados en la Tabla No. 5 más los resultados de ésta investigación. Solamente se tomaron resultados correspondientes a áreas de páramo en buen estado de conservación, de acuerdo con lo expresado por cada autor consultado. Cabe resaltar que en todos los casos, la determinación del contenido de carbono orgánico en suelos se realizó con técnicas de campo y con la misma metodología de análisis químico (Walckley-Black). El IDEAM facilitó la información sobre las variables climáticas (temperatura y precipitación promedio multianual) de cada una de las áreas de éstos estudios. A la postre, se graficó el contenido de carbono de todos los estudios versus cada una de éstas variables (Figuras 14, 15 y 16).

ANÁLISIS POLÍTICO - ECONÓMICO:

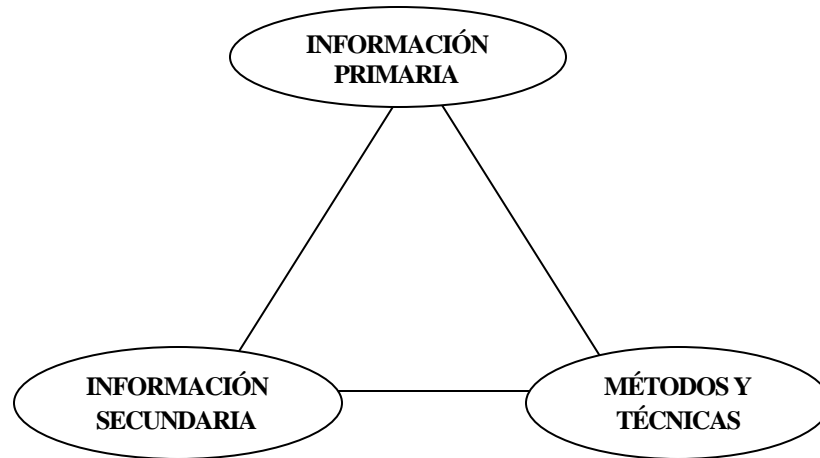
Se realizó una búsqueda de literatura tanto nacional como internacional, de aspectos económicos, políticos, de negociación y técnicos-científicos. También se realizó una consulta a expertos sobre el ciclo del carbono, el Mecanismo de Desarrollo Limpio y en general el cambio climático. Las personas entrevistadas aparecen citadas en pies de página como

²⁰ La cantidad total de carbono orgánico en suelo es igual a: Área * densidad aparente del suelo * % de carbono * profundidad de la muestra. Bendeck 1992

²¹ El mantillo es un material de origen vegetal de densidad similar a la cascarilla de arroz, cuya densidad aparente es 0.3 g/cm^3 (0.0003 kg / ha), o el aserrín: 0.28 g/cm^3 (0.00028 kg / ha). Bendeck, Myriam. 2003. Comunicación Personal

comunicaciones personales. La información obtenida se trianguló tal como se representa en la Figura No. 9 y es presentada en el capítulo de la discusión.

FIG. 9. Triangulación de la información

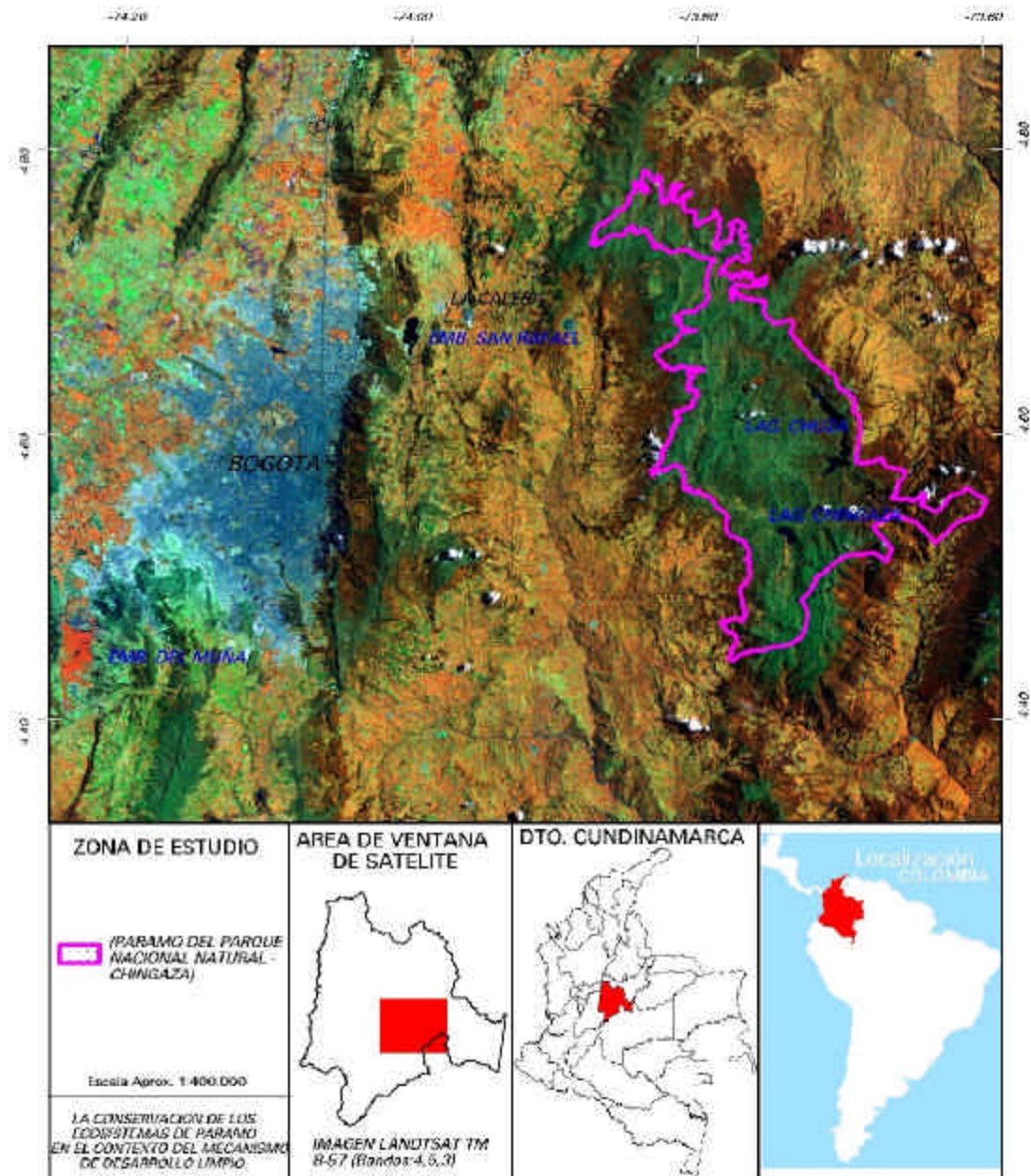


Se realizó una comparación entre la rentabilidad de un eventual proyecto de conservación MDL en el páramo y su costo de oportunidad. Se tomaron fuentes secundarias como DNP e IICA en Agrocadenas (2003) para realizar los cálculos de ganancias netas en una hectárea de páramo por cultivos de papa (costo de oportunidad) y, se tomó una estimación del precio de una tonelada de CO₂ equivalente capturada, realizada por Black (2003) en Del Valle, *et al* (2003) así como la información producida en este estudio y la de Hofstede (1999) para calcular los ingresos que generaría un proyecto MDL de conservación en el páramo. Se debe tener especial cuidado con ésta información ya que corresponde a una primera aproximación y se debe corroborar si los datos pueden ser extrapolables.

MARCO GEOGRÁFICO:

Área de estudio:

MAPA NO. 5 Ubicación espacial del área de estudio.



La fase de campo de ésta investigación, se llevó a cabo en el PNN Chingaza, ubicado entre los municipios de La Calera y Guasca, dentro de las siguientes coordenadas geográficas: 4°37' y 4°35' Latitud Norte y 73°30' y 73°53' Longitud Oeste.

Aspectos climáticos, fisiográficos y bióticos:

El sistema hidrográfico del área del páramo de Chingaza está constituido en su gran mayoría por las cuencas de los ríos Guatiquía y Chuza. Se presentan un sinnúmero de quebradas que drenan hacia el sureste y noroccidente, entre las que sobresalen: Piedras gordas, Chicua y Cajón. Dentro del área se encuentran aproximadamente 30 lagunas de tamaño variable que permanecen con agua abundante todo el año, como Siecha, Buitrago y Laguna Seca.

Thornwaite clasifica el clima del páramo de Chingaza como del tipo A perhúmedo y, según el sistema de Holdridge, está localizado en las zonas de vida páramo subalpino y bosque pluvial montano (Chamorro 1989).

El comportamiento de las lluvias es monomodal, lloviendo constantemente durante la mayoría de los meses del año. La humedad relativa media es del 89%. La temperatura promedio es de 4.7°C y recibe 2.82 horas/día de brillo solar (IGAC 1988).

En comparación con otros páramos, en el páramo de Chingaza la intervención humana ha sido menor debido a que la mayoría del área se encuentra como reserva natural del sistema de Parques Nacionales U.A.E.S.P.N.N y además, su uso es muy limitado por las condiciones superhúmedas del área.

La importancia de la humedad ante todo radica en la influencia de los vientos alisios; de ésta manera la vertiente oriental de la cordillera presenta una mayor humedad por la condensación de las masas de aire húmedas, provenientes de los Llanos; la vertiente occidental, por la carencia de éstas masas de aire húmedo, presenta una marcada tendencia a la sequedad (IGAC 1988).

Anteriormente, el desmonte de la vegetación original debido a la actividad antrópica causó un cambio radical, así lo que debía ser un sitio con vegetación cerrada, es ahora escasa conformada por especies de las familias gramíneas (*Calamagrostis* y *Swalenochloa*) y *Compositae* (*Senecio* y *Agrostis*).

El área se halla sometida a quemas periódicas por los campesinos para aprovechar los rebrotes y yemas para el mantenimiento de la ganadería.

Como consecuencia de la acción continua del fuego es casi imposible encontrar formas arbustivas en los espacios abiertos; solo en las partes rocosas se permite el desarrollo de manchas de vegetación y entre las especies más características en el estrato semiarbustivo se encuentran: romero (*Diplostephium rosmarinifolium*), chusque (*Chusquea sp*), chilco (*Baccharis trinervis*), cruceto (*Barnadesia spinosa*), espuelo (*Berberis glauca*), mortiño (*Hesperosmeles goudotiana*), ají de páramo (*Drymis granatensis*), laurel de cera (*Myrica policarpa*), garrocho (*Viburno cornifolium*), tibar (*Escallonia tubar*).

La diferenciación de las comunidades vegetales se basa fundamentalmente en las consideraciones altitudinales, en la fisionomía y composición florística. Las principales comunidades del páramo de Chingaza son:

- *Jamesonia imbricata* y *Calamagrostis effusa* con *Espeletia grandiflora*
- *Calamagrostis effusa*, *Espeletia grandiflora* y *Swallenochloa tesseleta*
- *Sphagnum spp.* y *Swallenochloa tesseleta*
- *Miconia chionophylla* y *S. tesseleta*
- *Calamagrostis effusa* y *S. tesseleta* con *Azorella multifida*
- *Juncus cyperoides* y *S. tesseleta* con *Azorella multifida*
- *Aragoetum abietinae swallenochloctosum*
- *Arbustos: Solanum* y *Ribes* (IGAC 1988).

MARCO INSTITUCIONAL:

Esta investigación se realiza como requisito parcial para optar al título de Ecólogo en la Facultad de Estudios Ambientales de la Pontificia Universidad Javeriana. El estudio se realizó en el marco del convenio de cooperación de la Universidad con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Para la realización de la fase de campo de ésta investigación se requirió un permiso especial de la dirección de la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales - UAESPNN y del Parque Nacional Natural Chingaza.

MARCO LEGAL:

Para abordar este tema es necesario remitirse a las normas generales de la legislación ambiental, así como a las disposiciones especiales sobre usos del suelo, áreas protegidas, aguas, ordenamiento territorial, entre otras. Son importantes también otras normas que inciden en la protección de éstos ecosistemas, como las disposiciones sobre incentivos, entre otras, al igual que los Convenios Internacionales ratificados por Colombia, como el de Diversidad Biológica y la Convención Ramsar (Ponce de León 2002).

La misma autora explica que la aproximación fraccionada en la legislación ambiental tradicional colombiana presenta problemas a la hora de entender de manera integral conceptos ecosistémicos como los relacionados con el páramo. Un buen ejemplo es el Código de los Recursos Naturales Renovables, en donde se hace una división por capítulos para cada recurso natural (agua, flora, fauna, etc.).

Sin embargo, algunas disposiciones legales generales podrían servir para la protección de estos ecosistemas como la Ley 99 de 1993, que consagró algunos principios sobre la protección especial de páramos, subpáramos y nacimientos de agua. También la legislación de áreas protegidas regula de forma integral el manejo, conservación y protección de áreas declaradas dentro de diferentes categorías. En las regulaciones sobre aguas (decreto 1541 de 1978), también se encuentran previsiones sobre la preservación de éstos ecosistemas. También el código de los Recursos Naturales establece que los suelos deben usarse de acuerdo con sus condiciones y que su uso potencial y clasificación se determinará con base en los factores físicos, ecológicos y socioeconómicos de cada región (Ponce de León 2002).

A nivel de resoluciones, existe la resolución 0839 del 1 de Agosto de 2003, la cual regula específicamente el uso de los ecosistemas de páramo²².

²² Salazar, Henry. 2003. Comunicación personal

RESULTADOS:

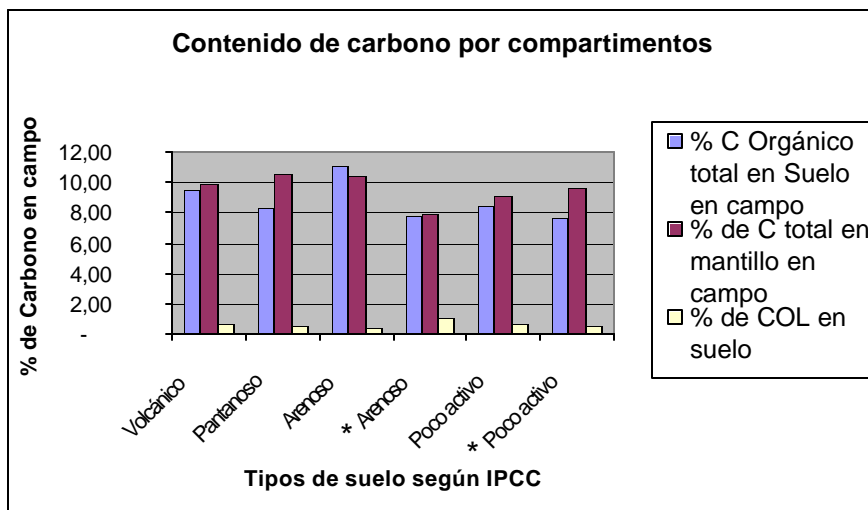
Los sitios que se seleccionaron no presentan claras diferencias en el tipo de vegetación, no así en cuanto a la altitud, como se observa en la Tabla No. 8

TABLA NO. 8 Tipo de suelo, Localización, y vegetación presente en las áreas de estudio.

Área de estudio	Tipo de suelo según IPCC	Localización	Tipo de vegetación presente en el área de muestreo
1	Volcánico	Laguna de Chingaza, cerca al mirador. Este muestreo corresponde a la cuenca del Río Chuza, Vertiente Oriental de la Cordillera Oriental. Localizado a 4°32'533" latitud N y 73°45'369" longitud W a 3400 m.s.n.m.	Frailejonal-Pajonal. Predominancia de <i>Espeletia grandiflora</i> y <i>Calamagrostis effusa</i>
2	Arenoso	Embalse de Chuza, sector Las Siervas. Este muestreo corresponde a la cuenca del Río Chuza, Vertiente Oriental de la Cordillera Oriental. Localizado a 4°37'737" latitud N y 73°44'118" longitud W a 3118 m.s.n.m.	Frailejonal-Pajonal. Predominancia de <i>Espeletia grandiflora</i> y <i>Calamagrostis effusa</i>
3	Pantanosos (acuíquico)	Laguna Seca, cerca de estación meteorológica. Este muestreo corresponde a la cuenca del Río Chuza, Vertiente Oriental de la Cordillera Oriental. Localizado a 4°40'28" latitud N y 73°47'16" longitud W a 3620 m.s.n.m.	Frailejonal-Pajonal. Predominancia de <i>Espeletia grandiflora</i> y <i>Calamagrostis effusa</i>
4	Poco activo	Laguna Charrascal. Este muestreo corresponde a la cuenca del Río Blanco, Vertiente Oriental de la Cordillera Oriental. Localizado a 4°41'706" latitud N y 73°50'521" longitud W a 2971 m.s.n.m.	Frailejonal-Chuscal. Predominancia de <i>Espeletia uribei</i> y <i>Calamagrostis effusa con Chusquea sp.</i>
5	Arenoso	Alto de Buitrago. Este muestreo corresponde a la cuenca del Río Guavio, Vertiente Occidental de la Cordillera Oriental. Localizado a 4°45'603" latitud N y 73°49'633" longitud W a 3532 m.s.n.m.	Frailejonal-Pajonal. Predominancia de <i>Espeletia uribei</i> , <i>E. grandiflora</i> y <i>Calamagrostis effusa</i>
6	Poco activo	Alto de Buitrago. Este muestreo corresponde a la cuenca del Río Guavio, Vertiente Occidental de la Cordillera Oriental. Localizado a 4°45'633" latitud N y 73°49'753" longitud W a 3510 m.s.n.m.	Frailejonal-Pajonal. Predominancia de <i>Espeletia uribei</i> y <i>Calamagrostis effusa</i>

En cuanto a las concentraciones de Carbono Orgánico, tanto en suelo, como en mantillo y el porcentaje de carbono en el suelo como COL, en los tipos de suelo muestreados, las diferencias, tal como se aprecia en la siguiente figura no son significativas:

FIG. 10. Contenido Total de Carbono en el Suelo y Mantillo y % de Carbono Orgánico Libre (COL) en los suelos del páramo de Chingaza.



* Corresponden a vertientes secas

La tabla 9 relaciona el contenido total de carbono orgánico del suelo a 20 cm de profundidad, el contenido que corresponde a las fracciones estables y lábiles, y el contenido de carbono que se emitiría a la atmósfera en forma de dióxido de carbono a la atmósfera en un eventual cambio de uso del suelo en el páramo de Chingaza.

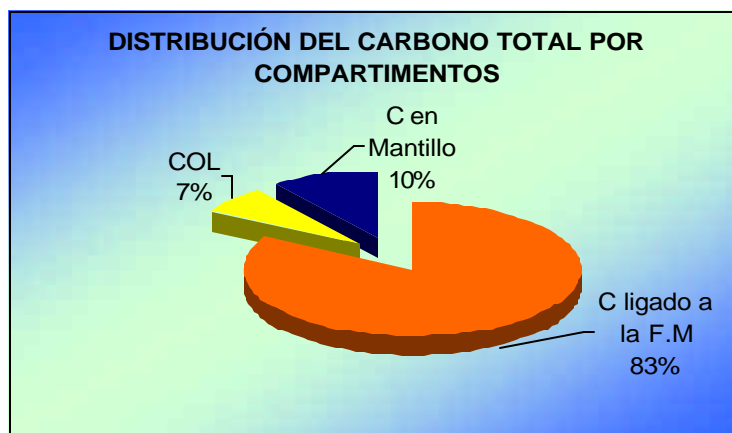
TABLA NO. 9 Carbono orgánico total, por compartimentos, lábil y estable en los tipos de suelo del páramo de Chingaza.

Clasificación de suelos según IPCC	Area (Hectá-reas)	Toneladas de C orgánico en suelo/ área a 20 cm de prof	Toneladas de C ligado a la F.M*/ área (C estable)	Toneladas de COL/ área (C lábil)	Toneladas de C orgánico en mantillo/ área	Toneladas de C elemental libre (liberable a la atmósfera)	Toneladas de CO ₂ liberable a la atmósfera
	A	B = C + D	C	D	E	F = D + E	G = F * 3,66
Volcánicos	7.191	75.917	70.602	5.315	6.387	11.702	42.829
Arenosos	17.570	205.753	189.293	16.460	19.332	35.792	130.999
Pantanosos	7.810	91.282	84.892	6.390	17.404	23.794	87.086
Poco activos	1.386	14.796	13.612	1.184	1.203	2.387	8.736
TOTAL	33.958	387.748	358.399	29.349	44.326	73.675	269.651

* Fracción mineral

La Figura 11 es un consolidado para el páramo de Chingaza; en el que se puede observar el aporte de cada uno de los compartimentos al carbono total. Casi el 20% del carbono contenido en los suelos de Chingaza puede ser liberado a la atmósfera.

FIG 11. Porcentaje de aporte al carbono total por compartimentos (Mantillo, Carbono ligado a la Fracción Mineral (C ligado a la F.M.) y Carbono Orgánico libre (COL)) en los suelos del páramo de Chingaza.



Cabe resaltar los compuestos de los que están formados tanto suelos como mantillo en el páramo de Chingaza. En el caso de los suelos, se encuentra que en un 80% están conformados de agua y carbono y, para el mantillo

incluso más de un 80% (Figuras 12 y 13). Lo anterior se expresa en carbono dado el enfoque de ésta investigación. Sin embargo, si se quiere dejar de hablar de carbono, para hablar de materia orgánica, el compartimento “otros”, estaría más reducido y correspondería a la fracción netamente mineral. Los valores de carbono se duplicarían en el caso del mantillo, pero se llamarían materia orgánica. De igual forma para el suelo, solo que en éste caso el carbono no se debe multiplicar por 2 sino por 1.724 (Duchafour 1984).

FIG 12. Distribución porcentual del carbono (COL + C ligado a la F.M.) y otros compuestos en los suelos del páramo de Chingaza.

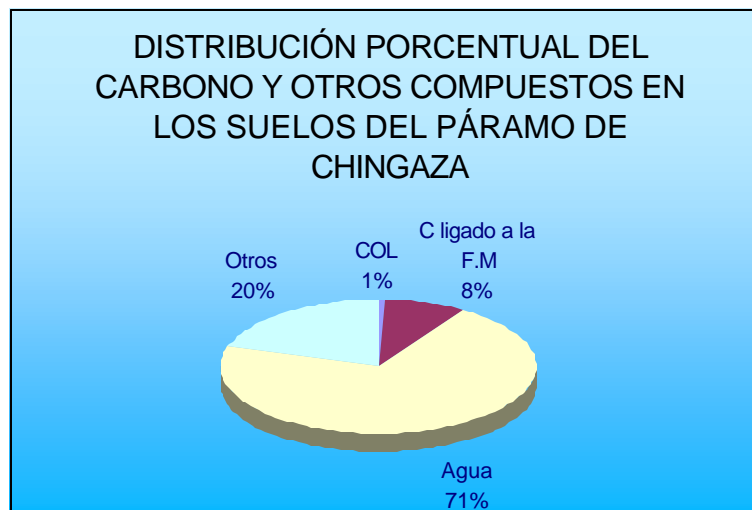
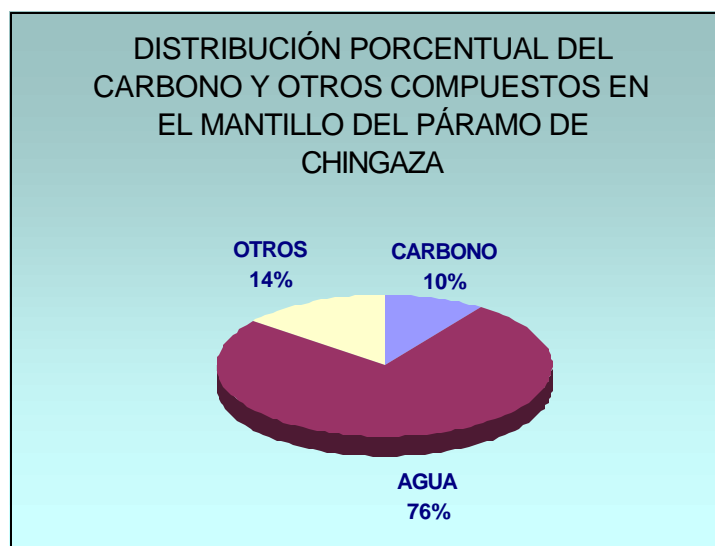


FIG. 13. Distribución porcentual del carbono y otros compuestos en el mantillo del páramo de Chingaza.



Los resultados del contenido de carbono obtenidos por otros estudios no arrojan correlaciones con las variables climáticas a los que éstos corresponden, contrario a los resultados de Pichot, *et al.* (Figura 5), es decir, no se cumple el que a mayor altitud o menor temperatura haya un mayor contenido de carbono en el suelo. Lo anterior puede ser observado en las (Figuras 14, 15 y 16). Esto posiblemente se deba al tipo de suelo, a la clase de cobertura vegetal y al grado de alteración de la misma entre otras razones.

FIG. 14. Resultados del contenido de carbono en suelos de páramo naturales de los estudios consultados y de éste estudio, en relación con la altitud.

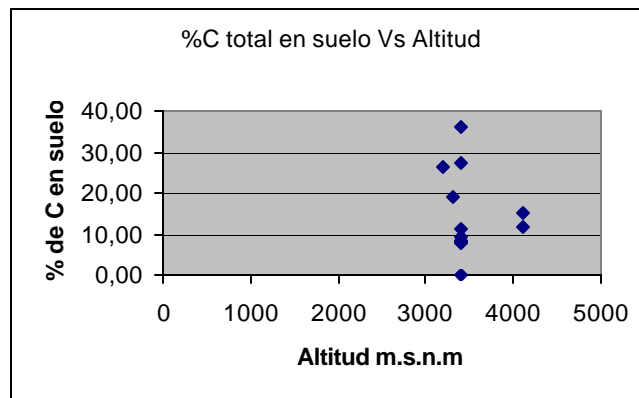


FIG. 15. Resultados del contenido de carbono en suelos de páramo naturales de los estudios consultados y de éste estudio, en relación con la temperatura promedio multianual.

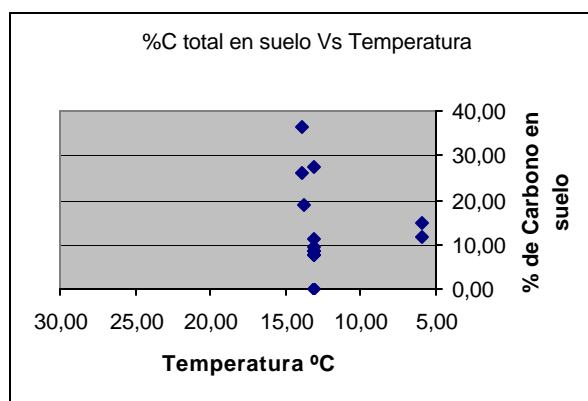
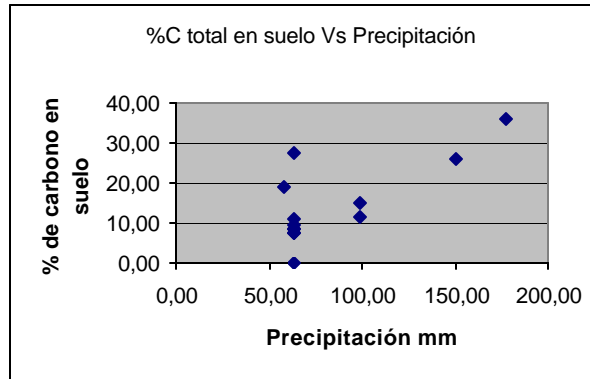
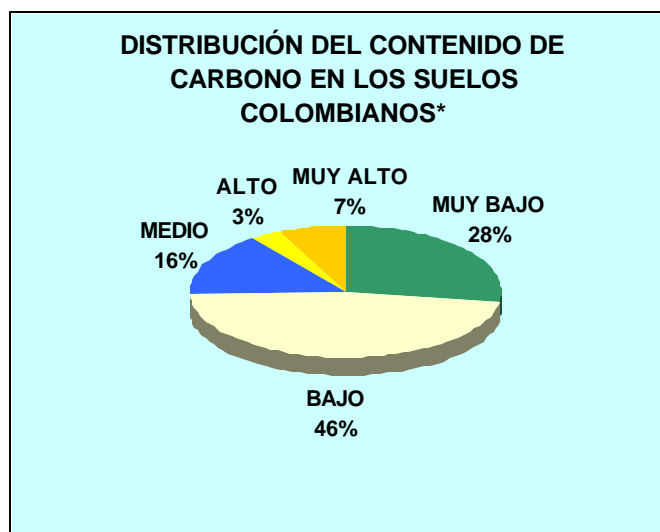


FIG 16. Resultados del contenido de carbono en suelos de páramo naturales de los estudios consultados y de éste estudio, en relación con la precipitación promedio multianual.



Por otra parte, tal como se pudo observar en el mapa No. 3, la mayor parte de los suelos en los ecosistemas colombianos poseen contenidos de carbono entre muy bajos y bajos, de acuerdo con los rangos del mismo mapa y la siguiente figura; muchos de los valores altos corresponden a áreas relativamente pequeñas que se encuentran en su mayoría en la cordillera de los Andes, muchas de éstas corresponden a los ecosistemas de páramo. En la Figura No. 17 se aprecia la distribución del contenido de carbono referida a áreas en los suelos del país.

FIG. 17. Distribución del contenido de carbono en los suelos colombianos.



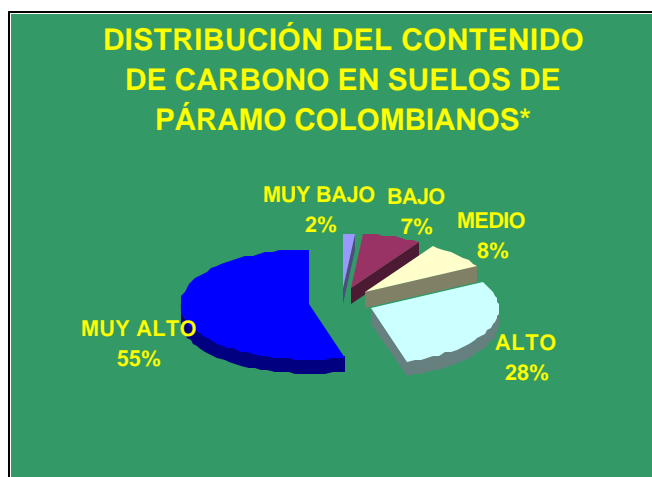
* Los porcentajes se refieren a áreas
Fuente: Modificado de IDEAM sin publicar

Rangos:

Muy bajo: <1 % C; **Bajo:** 1 - 1,5% C;
Medio: 1,5 - 2,5 % C; **Alto:** 2,5 - 6 % C; **Muy alto:** > 6% C

De acuerdo con la información suministrada por el IDEAM acerca de los contenidos de carbono en los suelos del país y la correspondiente a los límites de los ecosistemas de páramo (Figura 18 y Anexo 1), se encuentra que más de la mitad de la superficie de éstos poseen contenidos muy altos de carbono y que los valores bajos no suman ni siquiera el 10 % de la cobertura de páramos en el país.

FIG. 18. Distribución del contenido de carbono en suelos de páramo colombianos



* Los porcentajes se refieren a áreas
Fuente: Modificado de IDEAM sin publicar

Rangos:

Muy bajo: <1 % C; **Bajo:** 1 - 1,5% C;
Medio: 1,5 - 2,5 % C; **Alto:** 2,5 - 6 % C; **Muy alto:** > 6% C

En la Tabla 10 se indica la superficie total de páramos con contenidos de carbono muy altos en sus suelos y, el porcentaje de cobertura de los páramos en Colombia.

TABLA NO. 10 Cobertura de páramos en Colombia y superficie de éstos con contenido muy alto de carbono.

Colombia continental Km ²	Páramos Km ²	Superficie de páramos con contenido muy alto de carbono Km ²	% de cobertura páramos de Colombia
1.141.748	46.635	24.159	4,08%

Fuente: Modificado de IDEAM sin publicar

En cuanto a la rentabilidad tanto de conservar el páramo como de su costo de oportunidad, se encuentra que en una eventual ratificación del Protocolo de Kyoto y aceptación de los proyectos de conservación, los ingresos generados por el MDL en un proyecto de conservación de un páramo, no superarían los del costo de oportunidad (Tabla 11).

TABLA NO. 11 Comparación de la rentabilidad de un proyecto MDL de conservación en el páramo y su costo de oportunidad.

Precio promedio de la tonelada de papa desde 1997-2002 (en US\$ 2002)*	Rendimiento promedio para Colombia** (ton/ha)	Ganancias anuales netas promedio / ha (en US\$)*	Precio ton CO₂ capturada (US\$)***	Emisiones de CO₂ evitadas por conservación del páramo (ton/ha)****	Rentabilidad generada por la conservación de una ha de páramo como proyecto MDL (US\$)
209,47	16,19	1921,06	6,10	79,80	486,78

* **Fuente:** Modificados de Agrocadenas 2003

** **Fuente:** FAO. Cálculos Convenio DNP-IICA en Agrocadenas 2003

*** **Fuente:** Black 2003 en Del Valle, *et al* 2003. En ausencia de Estados Unidos y sin la oferta Rusa

**** Esta cifra corresponde a la suma de emisiones del suelo de ésta investigación más las de vegetación reportadas por Hofstede (1999). Sin tener en cuenta las que se producirían por lavado del carbono ligado a la fracción mineral

DISCUSIÓN:

Los nuevos enfoques de la Ecología, consideran una visión interdisciplinaria de la ciencia, una nueva forma de abordar los problemas ambientales en la que la solución a éstos no es sesgada a una sola perspectiva. La consideración es entonces amplia e incluso global, dadas las variables que entran en juego en problemas de éste tipo. Sin embargo, es muy difícil romper con las visiones clásicas. En pleno siglo XXI, aún se encuentran ecólogos, sesgados a una sola visión, en la cual los aspectos políticos o sociales, son descartados del análisis y se limitan netamente a realizar estudios puramente técnicos, incluso descontextualizados de una realidad social a la que le urge la producción de información aplicada a la solución de sus propios problemas.

El abordaje de ésta discusión, rompe con el esquema tradicional y se caracteriza por unir los eternamente divorciados enfoques técnicos y políticos en torno a un aspecto ambiental.

El tema del Cambio Climático es de hecho un tema interdisciplinario. Los hallazgos de ésta investigación provienen en gran parte de la Edafología y la Química del Suelo; sin embargo es de resaltar que éstos hallazgos no habían tenido comunicación con la ciencia relacionada con el cambio climático, dado que en éste tema, ningún autor consultado hace referencia a éstos, por lo tanto, ésta investigación se constituye en un puente que une los hallazgos de éstas ciencias.

Sin embargo, se reconoce que ésta investigación es una primera aproximación que permite tener la idea de un orden de magnitud del carbono contenido en los suelos de páramo y brinda algunos argumentos técnicos que puedan ser utilizados en el futuro.

El foco de discusión de éste trabajo, se centra en el beneficio de la conservación de los ecosistemas de páramo, desde la perspectiva de la mitigación del Cambio Climático por el reservorio de carbono que éste puede llegar a representar. Se resalta el papel del MDL, como posible herramienta adicional en la gestión ambiental de ecosistemas como el páramo, dado que se reconocen instrumentos de política existentes en el ámbito nacional, como los que se explican en el marco legal de éste documento.

EL SUELO Y EL MANTILLO COMO SUMIDEROS DE CARBONO

En el cambio de uso del suelo de conservación a ganadería o agricultura, no todo el carbono contenido en el suelo es liberado a la atmósfera en forma de CO₂. Como se vio en capítulos anteriores, el carbono susceptible de ser mineralizado rápidamente, se encuentra en el mantillo y la materia orgánica libre, el resto de éste elemento, se encuentra ligado a la fracción mineral,

pero proviene de las anteriores sustancias, por su parte, el carbono contenido en la vegetación, es mineralizado mediante la quema, aunque si la vegetación no es desmontada, las quemadas afectan totalmente a la necromasa y parte de la biomasa (IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo 2002).

Como se puede observar en la Figura No. 12, al considerar suelo y mantillo en un solo gran compartimento, se puede diferenciar el aporte de cada uno al contenido total de carbono y, más importante aún, se puede establecer, después de haber realizado una separación de las formas lábiles y no lábiles, el porcentaje total de carbono que se podría liberar a la atmósfera en un cambio de uso del suelo. Encontramos entonces que el 17% del carbono contenido en ese gran compartimento (suelo + mantillo) se mineralizaría fácilmente en forma de CO₂, el 83 % restante se podría perder por lavado.

En ninguna de las investigaciones consultadas se hace una separación de formas lábiles de carbono en el suelo, menos aún se analiza el mantillo. Lo anterior se debe a que en la visión tradicional toda la materia orgánica es considerada como innecesaria y, en campo se trata de desechar²³.

Lo novedoso de ésta investigación es precisamente el estudio de la materia orgánica libre y el mantillo, lo cual no se ha estudiado en éstos ecosistemas. Siempre se llega al estudio de la materia orgánica y el carbono total en suelo, y quedaba la incertidumbre sobre ¿qué porcentaje de todo ese carbono es una fracción estable y que porcentaje se emitiría a la atmósfera en forma de CO₂? Pues con ésta investigación se tiene más certeza al respecto. El carbono total en suelo no dice casi nada con respecto al cambio climático, ya que no se sabe si en un eventual cambio de uso del suelo el carbono se emite a la atmósfera o se lava y llega a regiones bajas y finalmente a los océanos, donde está el gran reservorio de carbono. Desde éste punto de vista, sería igual conservar o no conservar el páramo a la luz del cambio climático: si se conserva, se mantiene el carbono en el suelo, si no se conserva, se lava y se une al gran compartimento de almacenaje. Con la información suministrada por ésta investigación se puede afirmar que los páramos deben ser conservados en términos de cambio climático, no solo por ser indicadores del mismo y altamente vulnerables, sino porque su contenido de carbono en fracciones lábiles y mantillo, se emitiría directamente a la atmósfera contribuyendo al efecto invernadero. Lo anterior principalmente por el desmonte y quema de la vegetación y mantillo que mineralizan casi en su totalidad el carbono y que exponen al suelo desnudo a la acción directa del sol para la agricultura y la ganadería. Sin embargo, para que el argumento sea más completo, se deben realizar los estudios de mantillo y materia orgánica libre en áreas disturbadas, además de considerar el componente vegetación en las áreas naturales. También hace falta

²³ Gómez, Carlos. 2003. Comunicación Personal. IDEAM

estudiar el carbono contenido en las turberas y qué porcentaje de éste sería susceptible de ser liberado.

La metodología documentada en Del Valle *et al.* (2003), recomienda hacer un análisis del suelo por separado, esto es, separar las raíces en finas y gruesas, separar la necromasa del suelo y, por separado cuantificar químicamente el porcentaje de carbono en el suelo. La metodología usada en este estudio dista mucho de ésta anterior. Puede haber ventajas y desventajas entre una y otra pero, si los estudios se hacen con objetivos similares y se aplican las dos diferentes metodologías, los resultados que arrojarían serían contundentemente diferentes dado que los resultados de biomasa de raíces no necesariamente corresponderían a todas las fracciones lábiles del carbono del suelo (Bendeck 1992), además la separación y cuantificación separada puede introducir más errores en el análisis. Además, éstos mismos autores expresan que la metodología usada por ellos es tan costosa y difícil de realizar que en proyectos de medición de captura de carbono, generalmente no se mide el comportamiento subterráneo. Dado que en ésta investigación se demostró que la metodología usada para la cuantificación del carbono del suelo fue relativamente sencilla de aplicar y no costosa, se puede recomendar para futuros estudios. Por otro lado, a diferencia de la metodología usada por Del Valle *et al.* (2003), en el presente estudio los resultados muestran de manera clara una diferenciación entre las fracciones lábiles y estables del suelo.

Lo anterior muestra también que los estudios de materia orgánica libre, fracciones lábiles y estables, son prácticamente desconocidos por los científicos del cambio climático.

Estudios realizados en ecosistemas basales, especialmente en bosques de galería y pasturas en la Orinoquía (Bendeck 1992), muestran que en términos de porcentaje, el carbono total no cambia significativamente por el desmonte del bosque e implantación de pasturas. Sin embargo, éste comportamiento se atribuye al cambio drástico que sufre la densidad aparente por la introducción de pasturas. Es decir, en un suelo compactado se puede encontrar un porcentaje de carbono igual o incluso más alto que en uno que no lo está, debido a que se muestrea una masa mayor y se genera la sensación de que el contenido de carbono en los suelos desmontados es mayor. Sin embargo, ese es el comportamiento del carbono total, no el de la materia orgánica libre y el mantillo, que es lo que más interesa en ésta investigación, cuyo comportamiento se explicó con anterioridad.

En otras investigaciones citadas por Bendeck (1992), se indica que los cambios en los contenidos de carbono se suceden preferencialmente en los primeros centímetros (más o menos 10 cm) y parecen no tener relación con la quema, cuya temperatura puede exceder los 600°C en los primeros 2 cm

por encima de la superficie del suelo y menos de 70°C por debajo de los 3 cm. Probablemente tiene más efecto el uso del suelo, que la misma quema.

Se encuentran grandes diferencias entre los datos generales presentados por Hofstede (1999) (Tabla 5) y los resultados de ésta investigación (Tabla 9 y Anexo 5). Gran parte de la diferencia encontrada en los valores de C por hectárea en suelos de páramo, se debe a que en ésta investigación únicamente se está tomando la profundidad de 20 cm a la que fueron tomadas las muestras, Hofstede, toma los 2m de un perfil de páramo. Por otra parte, los valores de concentración de C, para el caso del páramo de Chingaza fluctúan entre 7 y 11 %, Hofstede tomó un valor promedio del 16 %. También las densidades aparentes con las que fueron calculados los valores son de igual forma diferentes. Lo anterior pone de manifiesto que en éste tipo de estudios, no se puede comparar de forma inmediata los resultados de las investigaciones y, dada la necesidad de información al respecto, es prioritaria la estandarización de un protocolo.

Según los datos de biomasa epigea calculados por éste investigador y los resultados del suelo de ésta investigación el mayor contenido de carbono liberable a la atmósfera se encuentra en la vegetación y el mantillo que en el propio suelo mineral, con una mayor proporción en la vegetación según los datos que reporta Hofstede.

Cabe resaltar que la importancia del mantillo, aparte de que protege el suelo de los agentes erosivos y de su alto contenido de carbono es su alta capacidad de retención de agua, que es aquí documentado por la observación de la diferencia entre el peso húmedo y el peso seco del mismo (Anexo 3). El mantillo actúa como una esponja. Por lo tanto, es altamente necesario conservar la estructura del páramo, ya que por un lado, el mantillo y en menor medida, el suelo (Figuras 12 y 13) actúan como una esponja retenedora de agua y por otro esa esponja está constituida de materia orgánica, de la cual la mitad es carbono elemental.

Aunque los datos suministrados por ésta investigación, clasifican los suelos del páramo de Chingaza dentro de la categoría de los muy altos (> 6%) dentro de las categorías del contenido de carbono del IDEAM, algunos autores como Hofstede (1999) y Rondón (2000), mencionan contenidos mucho más altos; la diferencia puede radicar en que en los resultados del carbono orgánico de los suelos estudiados, éstos correspondan a datos de concentración en laboratorio (suelo seco) o que éstos fueran estandarizados a su concentración en campo (suelo húmedo), como se realizó en éste estudio. La expresión de los resultados es muy diferente si se toman los datos como contenido de carbono en el suelo húmedo en campo a como salen del laboratorio, dado que la concentración de éste elemento cambia considerablemente. El método Walckley-Black (en IGAC 1990) para análisis de carbono no especifica si expresar los datos, tal como salen del laboratorio

o realizarles su estandarización a datos de campo. Es por eso que, se puede generar confusión a la hora de expresar los resultados (Véase en Anexos 3 y 4, los cambios en concentraciones de carbono entre muestras secas y en campo). Otra posibilidad hipotética es que los páramos estudiados por estos autores presenten una menor retención de humedad que Chingaza y por lo tanto el carbono esté más concentrado.

Por su parte, la humedad retenida por el suelo puede servir de argumento para pensar que en un cambio de uso del páramo la concentración de carbono del suelo aumentaría tal como se explicó en los antecedentes de éste documento; la densidad aparente aumentaría y la capacidad de retención de humedad disminuiría debido a las actividades agropecuarias. Lo anterior generaría la falsa percepción de que hay un mayor contenido de carbono en un suelo pisoteado y seco, sin embargo, el efecto real sería que hay la misma cantidad de carbono estable por una menor unidad de volumen. Lo que es cierto es que las fracciones lábiles quedan expuestas a los factores degradativos como la radiación solar y la actividad microbiana y por lo tanto el carbono capitalizado en las estructuras biológicas a través de la fotosíntesis, sería liberado como un compuesto más estable: el dióxido de carbono.

Lo anterior muestra que la concentración de carbono orgánico total en el suelo no es un buen indicador relacionado con el cambio climático. Por ésta razón autores como Moreno, H y Lara, W. (2003) en Del Valle, *et al.* 2003 han expresado que los muestreos no se deben restringir a los primeros horizontes del suelo y que por lo tanto se deberían evaluar profundidades mayores a un metro de profundidad. Lo anterior puede ser válido para una estimación más aproximada del contenido total de carbono orgánico en un suelo determinado, sin embargo, éste no es un buen indicador no solo por los cambios en la densidad aparente, sino también por que no evalúa el contenido de las fracciones lábiles, las que no se encuentran a más de 20 cm de profundidad, tal como lo documenta Bendeck (1992), por lo que un muestreo más profundo en éstos términos es innecesario.

En cuanto a la humedad y estudio del suelo por vertientes (húmeda y seca) se esperaba encontrar menor contenido de carbono en los suelos de la vertiente húmeda dado que la mayor humedad propiciaría el lavado de nutrientes y materia orgánica, sin embargo no se observan diferencias significativas en los resultados (Figura 10). Dado que el muestreo por vertientes se diseñó con base en cuencas de tipo regional (Cuenca del Río Magdalena y del Río Orinoco), y no en vertientes locales, es probable que en los resultados del contenido de carbono en los suelos hayan primado las características locales sobre las regionales y por esa razón no existan diferencias significativas.

Por otra parte, el carbono estable del suelo o ligado a la fracción mineral se debería incluir como un compartimento de almacenaje (Tabla 6), dado que como se ha visto, este carbono es estable y no volverá a ser emitido a la atmósfera. En éste punto es importante el páramo en términos de mitigación del cambio climático. La lenta descomposición hace que el carbono no se libere a la atmósfera sino que se humifique²⁴, aunque a una tasa muy lenta. Esto garantiza que el carbono quede acumulado de forma casi perpetua sea en el suelo o por erosión y lavado en los océanos y cuerpos de agua como sedimento.

Considero también que uno de los criterios para conservar los suelos de páramo y con ellos todo el ecosistema con respecto a los GEI, debe ser la materia orgánica libre. Si bien ésta es de solo 7 al 13% del Carbono total, hay extensas regiones con alto contenido de carbono en el suelo en todo el mundo (mapa No 1). Sin embargo, es incierto el riesgo que éste carbono sea liberado a la atmósfera. No se ha encontrado qué porcentaje corresponde a fracciones estables. Se deben realizar estudios de suelos por compartimentos en todo el mundo, al menos para llegar a factores de corrección por zonas, ya que el carbono total en suelos no parece ser un indicador altamente confiable para estimar los efectos de los GEI.

Los estudios tradicionales en suelos no hacen separación de MOL, y desprecian el mantillo, que son los aspectos más importantes a considerar en el suelo en términos de cambio climático. Ni siquiera la metodología del IPCC o en los informes del mismo se ha hecho referencia a las fracciones lábiles del carbono en los suelos

EXTRAPOLACIÓN DE DATOS:

Como se expresó en la metodología, el muestreo puede resultar no ser representativo, por lo tanto los resultados deben considerarse partiendo del supuesto de asumir áreas homogéneas y una representatividad de la muestra, algo que dista mucho de la realidad. Es cierto que se deben muestrear todas las áreas y cada uno de los tipos de suelo, sin embargo, los costos serían muy altos para un estudio de éste estilo y se necesita información para la toma de decisiones.

Aunque la materia orgánica del suelo es dinámica y su concentración puede variar por muestreos en diferentes geoformas o épocas del año, considero que las grandes diferencias observadas en los contenidos de carbono entre todas y cada una de las investigaciones consultadas (Tabla 5 y Figuras 14, 15 y 16) y esta investigación se deben a la confusión explicada con anterioridad acerca de la expresión de los resultados (datos “secos” de laboratorio o “húmedos” de campo), más que a diferencias en las áreas de

²⁴ Bendeck, Myriam. 2003. Comunicación Personal

estudio o metodológicas. Incluso dentro de los mismos datos de estudios de carbono en suelo dentro del páramo de Chingaza, hay notables discrepancias. Infortunadamente, ninguno de los estudios consultados hizo explícita la forma en que se expresaron los resultados (húmedos o secos), por consiguiente la construcción del modelo y extrapolación de datos de carbono a los páramos del país (segundo objetivo de ésta investigación) no fue posible. Sin embargo, se graficaron en nubes de puntos las concentraciones de carbono con las variables temperatura, humedad y altitud (Figuras 14, 15 y 16) y, efectivamente no existe una correlación lógica contrario al estudio de Pichot, *et al.* (1978) (Figura 5). En el caso de los estudios de estos autores, las tendencias de altos contenidos de carbono en el suelo corresponden claramente a altas altitudes y bajas temperaturas. En los demás autores consultados, ésta tendencia no se mantiene. Por tanto el modelo no es viable de realizar, al menos con la información que se dispone. No hay una tendencia clara para ninguna variable, por lo tanto ésta investigación se limitó al estudio de Chingaza. Para que los estudios futuros sean comparables, se recomienda que al menos los estudios sobre los contenidos de carbono y su relación con el cambio climático sigan los mismos protocolos. Si se siguen las metodologías del IPCC los estudios serán comparables a nivel global. También se recomienda estandarizar un protocolo para el estudio de carbono en campo y laboratorio ya que el problema de las grandes diferencias entre estudios puede deberse a utilizar protocolos diferentes para los mismos métodos.

Las concentraciones de carbono de suelo y mantillo no se pueden promediar en un gran total porque esto supondría que el suelo a 20 cm de profundidad y el mantillo tienen el mismo peso y densidad aparente, aunque podría haber rangos de confiabilidad, se podría incurrir en errores, dado que el porcentaje de aporte de las fracciones lábiles sería del 56% al carbono total, lo que dista mucho de una aproximación más real, como se ve en la Figura 11, que incluye en los cálculos de los datos los valores de densidad aparente y profundidad de suelo y mantillo.

Con respecto a la metodología IPCC 1996, para el cálculo de carbono en el módulo de cambio de uso de la tierra y silvicultura, ésta aproximación no es muy conveniente para el cálculo de carbono contenido en suelos en ecosistemas naturales, dado que fue diseñada con el ánimo de cuantificar las pérdidas de carbono debidas a cambios de uso del suelo. La metodología recomienda evaluar el contenido de carbono comparando en el tiempo con 20 años de diferencia. En el caso del páramo de Chingaza, que corresponde a un área protegida, éste cambio no debe ser considerable en cuanto a factores antrópicos, dado su bajo régimen de perturbación. Es probable que se encuentren diferencias en los contenidos entre cada uno de los tipos de suelo en el tiempo, pero más debido a factores naturales, pedogenéticos, etc. Por otro lado, la clasificación de suelos del IPCC puede no ser lo suficientemente adecuada para casos locales como en el caso de Chingaza.

De acuerdo con sus características taxonómicas, en el páramo de Chingaza, un suelo arenoso podía ser poco activo también, por ejemplo.

De haber realizado el modelo, se habría permitido extrapolar datos a otros páramos donde no se cuenta con suficiente información y, finalmente llegar a un consolidado nacional de contenido de carbono en suelos de ecosistemas de páramo. Sin embargo, ésta información hubiera estado basada en concentraciones totales de carbono en suelo y no en fracciones liberables a la atmósfera (sin mantillo ni COL), lo cual establecería la cantidad de carbono retenida en los suelos pero no diría mucho acerca de las emisiones de CO₂ generadas en un eventual cambio de uso del suelo de éstos ecosistemas.

Tampoco se cuentan con datos reales de las tasas de degradación del ecosistema de páramo en Colombia. Los estudios realizados por el IDEAM sobre el cambio de coberturas entre los años 1970 y 1990 a través de sensores remotos, muestran resultados en los que la cobertura de páramo, en general aumenta en el tiempo, a pesar de unas disminuciones puntuales. Estos resultados no muestran la problemática real de éstos ecosistemas, debido al proceso de paramización que consiste en el reemplazo de la vegetación boscosa por vegetación abierta de “tipo páramo”, lo que genera problemas al interpretar las imágenes de satélite. En éste proceso los páramos naturales no aumentan su cobertura y los bosques altoandinos se fragmentan y reducen (IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo 2002). Por esta razón no es posible predecir, al menos con estos datos y tendencias, la cantidad de carbono que sería liberado en un futuro de continuar con las mismas tasas de destrucción de estos ecosistemas. Los contenidos bajos de carbono observados en páramos en (Figura 18) se pueden deber a este proceso precisamente.

Si se tiene en cuenta la información producida por ésta investigación con las salvedades anteriormente mencionadas se podría hacer una comparación con los valores de emisiones nacionales de CO₂ para cambio de uso de la tierra y silvicultura realizadas por IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2001). Según éstos autores, Colombia emitió en 1994, 16.540 Gg (equivalentes a kilotoneladas) de CO₂, de acuerdo con los resultados de ésta investigación, de no conservar el páramo de Chingaza se emitirían 265,23 Gg de éste gas, únicamente considerando los suelos y, si se tiene en cuenta que la información extrapolada de ésta investigación puede resultar no representativa.

Cabe resaltar aquí, que no obstante no haber encontrado considerables diferencias entre la concentración de carbono entre réplicas ni muestras, la gran diferencia se la encuentra en los pesos, bien sean en campo o secos. (Anexos 3 y 4). Esto debido a que no en todos los sitios el mantillo presentaba la misma cantidad de materia orgánica a pesar de que su

concentración fuera similar y que las muestras fueron tomadas a la misma área de cuadrante. Entonces, dada la alta variabilidad en el peso y la profundidad del mantillo, se debe tener en cuenta que la extrapolación de datos de mantillo puede ser muy imprecisa (Anexos 3 y 5).

Como se indica en éste estudio, las cifras del carbono por hectárea de páramo que podría ser liberado a la atmósfera son considerables, en un eventual cambio de uso del suelo en Chingaza, por lo tanto, éste es un elemento que nutre el argumento sobre la conservación de éste ecosistema, sin embargo, los resultados de los cálculos de costo de oportunidad no son favorables para estos ecosistemas. Los resultados de la tabla 11 muestran claramente que en términos económicos no es viable conservar el ecosistema de páramo de Chingaza bajo el esquema del MDL, dado que un proyecto de éste tipo no alcanzaría, de acuerdo con las tendencias a cubrir ni siquiera el costo de oportunidad.

Lo anterior se puede deber a que en efecto el cultivo de papa tiene una alta rentabilidad versus los precios estimados de una tonelada de CO₂ reducida que son relativamente bajos debido a que, a grandes países demandantes como EE.UU. no les interesa participar en el mercado de reducción de emisiones.

EL MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO Y LOS ECOSISTEMAS DE PÁRAMO

La deforestación y otras actividades de uso del suelo producen entre el 20% y el 25% de las emisiones anuales de CO₂ a la atmósfera. La gran mayoría de estas emisiones proviene de los países ecuatoriales. En América Latina, la deforestación sigue siendo un fenómeno que crece aceleradamente en la mayoría de los países. En términos sencillos se puede decir que la causa de esta tendencia reside en la percepción de que talar los bosques y transformar los ecosistemas naturales para darles otro uso es una opción más rentable que mantenerlos en pie. Evitar la deforestación y destrucción de los ecosistemas naturales permitiría mantener almacenado en la biomasa, los suelos, las raíces y la hojarasca, una cantidad de carbono que de otra manera se liberaría al aire. Y este servicio, el de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, tiene un claro valor para el mundo entero, al contribuir a disminuir la velocidad del calentamiento global (Castro, *et al.* 2002).

Sin embargo, aunque el cambio de uso del suelo asociado con la deforestación y degradación de los ecosistemas naturales y su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero son hechos con una amplia certeza científica, dadas las abundantes evidencias, muchas de las cuales han sido mencionadas en éste documento, la posibilidad de que la

comunidad internacional pague por el servicio de almacenar carbono o reducir su emisión es menos segura. El Protocolo de Kyoto estableció el Mecanismo de Desarrollo Limpio, como el único mecanismo formal en el ámbito internacional que incentiva la inversión privada en proyectos de países en desarrollo con el objetivo primordial de neutralizar las emisiones de gases de efecto invernadero. Actualmente se desarrolla un agitado debate internacional sobre la conveniencia o no de incluir los proyectos de conservación dentro de las actividades permitidas en el MDL; sin embargo, los proyectos de conservación y de reducción de la deforestación son controversiales y han encontrado oposición para ser incluidos en el MDL en el período de cumplimiento de compromisos 2008-2012. Las decisiones al respecto de la no inclusión de proyectos de éste tipo fueron tomadas en la COP 7 de la CMNUCC en Marrakech, en noviembre de 2001. Decisión 17/CP.7 de la COP 7.

A pesar de lo anterior, se han realizado ya importantes proyectos de conservación forestal para reducción de emisiones, financiados por la inversión privada en países como México, Bélice, Costa Rica, Ecuador, Colombia, Brasil, Uganda y Malasia. Las toneladas de CO₂ almacenadas por estos proyectos, son potencialmente valiosas si están incluidas dentro del MDL y de muy poco o ningún valor si no se aceptan como parte del MDL (Castro, *et al.* 2002).

Una de las razones por que los proyectos de conservación sean tan controversiales y por lo tanto excluidos de la negociación es que en primer lugar, los países industrializados y economías en transición (Anexo B de la CMNUCC) no manifiestan interés en incluir los proyectos de conservación dentro de los proyectos de mitigación²⁵; dado que no es conveniente para ellos pagar su deuda ecológica conservando ecosistemas naturales para que éstos eviten emitir su contenido de carbono a la atmósfera.

En segundo lugar, la falta de información sobre la dinámica del ciclo del carbono en ecosistemas de los países no Anexo B. En éste aspecto, ésta investigación aporta a esa falta en el conocimiento científico, aumentando la capacidad y reduciendo la incertidumbre para poder tomar decisiones políticas más acertadas, lo que implica que Colombia pueda adquirir más legitimidad en las Negociaciones Internacionales en el contexto global.

Es verdad que en el tema del cambio de uso del suelo, al igual que en muchos otros temas relacionados con el cambio climático, hay una gran incertidumbre. Sin embargo, el IPCC ha producido información muy pertinente que ayudaría a tomar decisiones acertadas respecto a estos temas; pero en la realidad sucede que las decisiones responden más a intereses políticos que a la información de carácter técnico. De hecho, R

²⁵ Rodríguez, Manuel. 2003. Comunicación Personal

Watson, presidente del IPCC, manifestó en su momento que los proyectos de conservación debían ser incluidos para las actividades y proyectos del MDL²⁶.

Luego de estos argumentos, se entiende entonces, cómo un ciclo tan complejo puede ser reducido por la negociación internacional al compartimiento activo de carbono despreciado de la biomasa epigea en plantaciones forestales. Dadas las incertidumbres es preferible tener en cuenta los proyectos de reducción de emisiones en la fuente. De hecho, en UNDP (2000), se explica que los proyectos forestales y de conservación, distraerían a los países del mercado real de reducción de emisiones provenientes del desarrollo energético; en los proyectos de conservación, los gobiernos podrían reclamar créditos por actividades que hubiesen hecho de cualquier manera y, en los proyectos de captura como plantaciones forestales, es posible que esto se convierta en un incentivo perverso, mediante el cual se podrían convertir ecosistemas naturales en equilibrio dinámico en plantaciones de rápido crecimiento.

En efecto, Shulze *et al.* (2000) citados en Del Valle *et al.* 2003, concluyeron a partir de un análisis con base en los conceptos de productividad primaria bruta, productividad primaria neta, productividad neta del ecosistema y productividad neta del bioma, que el reemplazo de ecosistemas antiguos manejados (bosques), que no ganarían créditos de carbono como parte del MDL, generaría una emisión masiva de carbono hacia la atmósfera debido al reemplazo de grandes existencias de carbono por otras de tamaño minúsculo. Este efecto puede anular el efecto de la forestación y reforestación para aumentar la capacidad del sumidero terrestre de carbono. Esto sucede porque el IPCC tiene en cuenta la productividad primaria neta que no contabiliza las pérdidas de CO₂ por respiración de los heterótrofos, mientras que la productividad neta del ecosistema si la tiene (Del Valle *et al.* 2003).

Por su parte, el enfoque centrado en la biomasa epigea en los cálculos de captura de carbono, puede conllevar a grandes errores de percepción, ya que como se vio anteriormente otros compartimentos como el suelo pueden llegar a ser más importantes. El contenido de carbono orgánico total en el suelo es tres veces mayor al de la vegetación y puede existir una fijación neta si se considera el proceso de humificación en ecosistemas como los páramos. No solo la reducción o la absorción neta de carbono es importante; evitar que éste se emita lo es de igual forma, dado que significa una disminución en las emisiones de CO₂ en el tiempo, considerando las tasas de cambio de uso del suelo.

²⁶ Rodríguez, Manuel. 2003. Comunicación Personal

Por su parte, el hecho de aceptar únicamente proyectos de forestación o reforestación en los que la adicionalidad, se mediría en términos del carbono fijado por la biomasa epigea y, el que los proyectos de conservación, se entiendan únicamente desde la perspectiva forestal (es decir sobre todo desde su componente leñoso), en una eventual aceptación futura de éste tipo de proyectos implicaría la exclusión de los ecosistemas de bajo contenido leñoso y alta acumulación de carbono en suelo y otros compartimentos, como es el caso del páramo y algunos pastizales. Por lo tanto es necesario cambiarle el enfoque netamente forestal al hablar de los proyectos de conservación.

Dicho enfoque puede tener su fundamento en que, en principio, parecería mejor invertir esfuerzos y recursos en la conservación de ecosistemas boscosos como el bosque húmedo tropical o el bosque andino, dado que en un eventual incendio podrían emitir más CO₂ a partir de su biomasa leñosa, tal como lo explica Hofstede (1999).

Ha quedado entonces argumentada la importancia de la conservación de ecosistemas como el páramo como retenedores de carbono que potencialmente se emitiría a la atmósfera y contribuiría al efecto invernadero, gran tensionante en el cambio climático global. Sin embargo, los instrumentos políticos, legislativos y económicos para controlar el proceso de degradación de éstos ecosistemas, en términos del cambio climático no son claros. Por una parte, todavía hay incertidumbre acerca de la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto. Para lograr alcanzar al menos un 55% de las emisiones de GEI mundiales necesarias para la entrada en vigencia del Protocolo. Que Estados Unidos o Rusia ratifiquen es muy poco probable, por lo cual, el Protocolo de Kyoto todavía es algo no tangible y el MDL, que nace del PK, lo es de igual forma. Sin embargo, si éste fuera una realidad, los ecosistemas de páramo serían muy específicos para ser tenidos en cuenta, dado que, a pesar de poseer un alto contenido de carbono por unidad de área y todas las demás características relacionadas con el Cambio Climático que han sido explicadas con anterioridad, únicamente están representados en cinco países de la franja intertropical con un porcentaje de cobertura muy bajo (4% para el caso de Colombia). Por lo anterior, es cierto que los ecosistemas de páramo deben ser conservados, sin embargo, los instrumentos para lograr la conservación de éstos y otros ecosistemas, a la luz del cambio climático no están aún muy claros.

Cuidar el páramo es responsabilidad global por su acumulación milenaria de carbono en suelos y turberas. Otras propiedades del ecosistema de páramo, como la importante regulación hídrica que ejercen éstos ecosistemas han sido estudiadas y están al menos más documentadas. Como se observó en ésta investigación, si se conservan los ecosistemas de páramo como reguladores hídricos, también se está conservando su estructura retenedora: consistente en vegetación, materia orgánica y compuestos húmicos, de los

que alrededor de la mitad es carbono. Sin embargo, esto, no puede servir de argumento en contra de la conservación de los ecosistemas de páramo en el contexto del cambio climático. Los incentivos para proteger éstos ecosistemas como reguladores hídricos deben ser típicamente domésticos porque su pérdida afectaría a ciudades y poblaciones puntuales dentro de los países que los albergan, pero el incentivo para conservarlos como mitigadores del cambio climático debe ser internacional, dado que una liberación de su contenido de carbono a la atmósfera afectaría en forma global.

En algunas regiones no es suficiente con los incentivos para el agua (si los páramos no están protegidos o no surten con agua a una población), por lo que debería existir otro tipo de incentivo que los abarque en una forma más general. Los incentivos a la conservación a través de la mitigación o adaptación al cambio climático podrían desempeñar ésta función.

Como se ha documentado, éste ecosistema muy complejo en términos de sus ciclos biogeoquímicos. Un solo criterio para conservarlos teniendo en cuenta la falta de conocimiento de los mismos es el Principio de Precaución. El páramo con un porcentaje de cobertura tan bajo en el territorio continental colombiano, puede funcionar como uno de los mejores retenedores de carbono, tal como lo compara Hofstede (1999) (Tabla 5)

PROBLEMÁTICA DE LOS PÁRAMOS Y OPCIONES PARA SU CONSERVACIÓN A LA LUZ DEL CAMBIO CLIMÁTICO

La problemática asociada con el páramo consiste en que generalmente los sectores por encima de los 3500 m.s.n.m. se dedican a una ganadería de pastoreo, mientras que las zonas por debajo de esta altitud se utilizan en agricultura con cultivos de papa y ganadería extensiva con pastos mejorados. Para realizar todas estas actividades han sido necesarias la remoción y en muchos casos quema tanto de la vegetación como del mantillo y arado del suelo. Los ecosistemas de páramo, deberían dedicarse a la conservación con el objeto de preservar los recursos hídricos esenciales y el carbono almacenado. Sin embargo, por la presión antrópica sobre la tierra, muchas zonas se han adaptado para la actividad agropecuaria, con la consiguiente pérdida de la estructura del suelo, de retención de agua y carbono por la materia orgánica y alteración de los ciclos biogeoquímicos (IGAC 1988).

Debido a que los ecosistemas de páramo son los ecosistemas de alta montaña que presentan la mayor diversidad, a que son reguladores hídricos y que se constituyen como espacios de vida para las comunidades, han sido considerados dentro de la Convención Ramsar sobre humedales²⁷. Sin

²⁷ Hofstede, Robert. 2003. Comunicación Personal

embargo, a éstos ecosistemas estratégicos no se los ha considerado ni siquiera en políticas nacionales por otras funciones como la retención de carbono atmosférico.

Seguramente, no solo los ecosistemas de páramo deben ser considerados como unos buenos retenedores de carbono atmosférico, probablemente hay otros tipos de ecosistemas con dinámicas parecidas, como el bosque andino y otros sistemas oligotróficos. Por lo tanto, hay que desarrollar estudios en todos los compartimentos y de ser posible en todos los ecosistemas para tener una mayor certeza acerca del funcionamiento real y específico del ciclo del carbono con el fin de poder tomar decisiones políticas más acertadas y no basarse solamente en modelos fundamentados en los supuestos de otras regiones como la temperada.

Tanto las condiciones de los suelos de páramos (alta susceptibilidad al deterioro, fuerte acidez, temperatura edáfica baja, pedregosidad, muy alta retención de humedad, escaso desarrollo genético, evolución muy lenta), como las del ambiente exterior (relieve muy quebrado a escarpado en amplios sectores, procesos erosivos, vientos fuertes, temperaturas inferiores a 10°C, días muy fríos, heladas frecuentes, lloviznas periódicas, alta nubosidad, niebla densa y poca luminosidad) indican que la mayor parte de las tierras de los páramos no tienen vocación agropecuaria (Cortés 1994). Teniendo en cuenta las anteriores características del ecosistema de páramo, podemos afirmar que el beneficio individual de transformar el páramo para introducir otro tipo de actividades productivas, no es una opción que genere un alto beneficio individual, a pesar de que muchas personas no tienen otra opción mejor, frente a un alto perjuicio colectivo. Se deben generar entonces, incentivos para que el beneficio colectivo sea más importante que el beneficio individual.

El MDL, se planteó como uno de los instrumentos que serviría para mitigar el cambio climático, no como un instrumento que contribuya a la adaptación del mismo. A pesar de lo anterior, en la negociación internacional, se pensó en incluir los proyectos de conservación dentro del MDL, sin embargo, dadas las altas incertidumbres en el sector forestal y de cambio de uso del suelo, las decisiones apuntaban a una exclusión total de éste sector. El punto intermedio de negociación fue entonces, aceptar únicamente los proyectos de forestación y reforestación, los cuales se reglamentaron en la COP 9 en diciembre de 2003²⁸.

El IPCC ha expresado que los proyectos sobre uso del suelo y cambio de uso del suelo (LULUCF por sus siglas en inglés) suscitan una cuestión concreta a propósito de la permanencia. Se han propuesto diversos modos

²⁸ Duque, Ángela. 2003. Comunicación Personal. Oficina colombiana para la Mitigación del Cambio Climático. (OCMCC) Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

de considerar la duración de los proyectos en términos de su capacidad para aumentar el carbono almacenado y para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, a saber:

- ✍✍ Deberían mantenerse a perpetuidad, ya que la “vuelta atrás” en un momento cualquiera invalidaría parcialmente el proyecto;
- ✍✍ Deberían mantenerse hasta que contrarresten el efecto de una cantidad equivalente de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera.

En los proyectos forestales, existe un potencial de absorción de carbono en la biomasa, que podría almacenar éste durante decenios en productos de la madera.

En torno a estos aspectos es de particular importancia lo expresado con anterioridad sobre la importancia del páramo como ecosistema en el que el carbono lábil es lentamente mineralizado y de ésta forma su almacenamiento es casi perpetuo.

En los antecedentes de éste documento, se muestra claramente la posición científica del IPCC y se indica que a diferencia de las plantaciones, los proyectos de conservación si garantizarían la permanencia perpetua, que es uno de los aspectos más debatidos a nivel internacional. Las decisiones tomadas responden evidentemente a intereses políticos, por lo que no considerar proyectos de conservación es un absurdo en la negociación internacional.

El IPCC reconoce además, que es considerable la biomasa presente sobre el suelo, el mantillo y los detritus de madera, la biomasa presente bajo el suelo, el carbono del suelo, o el material cosechado, como también que los valores de carbono en el suelo son mucho mayores a los de la vegetación (IPCC 2000). Sin embargo, el IPCC también toma los valores totales de carbono y no hace una separación de formas susceptibles de ser emitidas en forma de CO₂ a la atmósfera, como se hace en esta investigación.

Por su parte, si se piensa en crear los mecanismos para conservar el páramo se debe tener en cuenta que esos mecanismos deben generar ingresos que al menos se igualen al costo de oportunidad de quienes transforman éstos ecosistemas. Es decir, si el MDL sirviera para conservar el páramo, éste debería generarles a los agricultores que cultivan en el páramo, al menos el valor de las ganancias por cosecha de papa²⁹. Sin embargo como se observa en la Tabla 11, la rentabilidad de un proyecto MDL no alcanza a compensar ni siquiera éste costo de oportunidad, por lo que sería muy difícil

²⁹ Rodríguez, Manuel. 2003. Comunicación Personal

lograr la conservación de los ecosistemas de páramo únicamente a través de éste mecanismo. Por su parte, los ingresos de los cultivos de papa presentan ganancias netas anuales entre siembra y siembra, mientras que quedaría la incertidumbre de si el proyecto MDL generaría los Certificados de Reducción de Emisiones (CRE) en forma anual o en un solo desembolso destinado a la conservación; de cualquier forma, el proyecto no tendría ninguna viabilidad, dado que sería mucho más rentable destruir el páramo y cultivar papas que mantenerlo como reservorio de carbono.

Para la protección de un recurso o ecosistema, generalmente los Estados intervienen mediante un enfoque centralizado, definiendo restricciones de uso de los recursos (como la no habitación y explotación a partir de cierta cota); esto supone: un Estado capaz de captar información, supervisar, monitorear y vigilar a la población bajo intervención, sobrestimando su capacidad de control; una agencia gubernamental benevolente, que vigila de manera neutral sin importar el grado de credibilidad y legitimidad que tenga en la población; agentes incapaces de resolver el problema bien por su racionalidad económica o por su grado de educación; leyes sin costos de cumplimiento; decisiones frente a las actividades productivas según restricciones de ley e incentivos monetarios únicamente. Tales premisas son irreales frente a las condiciones institucionales que rodean la política ambiental. Desde la economía por su parte, se ha planteado el problema que afrontan los recursos naturales, como uno de los casos de la “tragedia de los bienes comunes”, que se refiere a lo que se expuso con anterioridad: la búsqueda del máximo beneficio individual, puede terminar en una tragedia; la desaparición del ecosistema (Guzmán 2002).

El 88%³⁰ los páramos no pertenecen a las áreas protegidas del sistema de parques nacionales, sin embargo algunos de estos pertenecen a otros esquemas de áreas protegidas. En el caso del Departamento del Valle del Cauca, por citar un ejemplo, el 60% de los páramos no se encuentran en áreas protegidas (Arana, *et al* 2002). Por lo tanto existen áreas de páramo sin regulación institucional en donde hacen falta incentivos para su conservación.

Es reconocido que uno de los mayores desafíos que se presenta en éste ecosistema es la búsqueda de compatibilizar conservación y desarrollo en un medio donde la fragilidad del ambiente está confrontada con el incremento del uso de la tierra y todo el ecosistema se ve claramente amenazado por los acelerados procesos de transformación y degradación (Monasterio y Molinillo 2002).

El argumento sobre el que cada país es responsable de proteger sus ecosistemas naturales, no se cumplen la medida requerida, como en el caso

³⁰ Calculado a partir de IDEAM sin publicar

colombiano o brasileño con el Amazonas. Las políticas y la legislación colombianas no funcionan en la medida requerida y hay un debilitamiento institucional que lo agrava. Por lo tanto es muy difícil que por si solas, las políticas del Gobierno o de otras instituciones (por ejemplo, las reformas del régimen de propiedad de las tierras, o los incentivos fiscales) puedan establecer unos incentivos para conservar ecosistemas como el páramo. Los gobiernos han perdido soberanía y en muchos casos las compañías multinacionales, muchas de las cuales manejan discursos cortoplacistas basadas en la actual economía de mercado han legitimado sus intereses por encima de éstos³¹. Por eso es necesario el compromiso internacional para legitimar los acuerdos de cambio climático porque las acciones para evitar la destrucción de ecosistemas naturales como responsabilidad de cada país no son muy significativas en muchos casos.

La capacidad para medir el impacto de las condiciones e incentivos que se establezcan a nivel internacional dependerá, en parte, del inventario de carbono y del sistema de seguimiento de cada país. A los países, sin embargo, podría resultarles muy difícil evaluar el impacto de las políticas de los gobiernos o de otras instituciones en comparación con otros factores humanos y naturales que inducen variaciones del carbono almacenado (IPCC 2000).

En el nivel nacional, si no hay incentivos para conservar el páramo, el bien privado puede primar sobre el colectivo, como se ha venido haciendo durante los últimos años, lo que se refleja en las pérdidas de extensas áreas de páramo. Si se hace un balance de solo los beneficios sociales y ambientales de un proyecto MDL en páramos, probablemente sería muy positivo; sin considerar su rentabilidad, un proyecto lo podría constituir el esfuerzo institucional, no solo gubernamental sino también de las organizaciones de la sociedad civil, por conservar el carbono acumulado en éstos ecosistemas y el que se acumulará lentamente en el futuro por la producción primaria. La definición de la línea base la podría constituir un modelo muy aproximado y con variables reales (institucionales, sociales, culturales y bióticas) de la actual tasa de degradación del ecosistema de páramo. El escenario con proyecto lo podría constituir un esquema organizacional y una propuesta de conservación para el ecosistema. Con lo anterior, se podría comparar el escenario con proyecto con la línea de base, determinando así la adicionalidad del proyecto de conservación. Por su parte, la permanencia del carbono sería perpetua si se considera a escala humana, sin embargo, habría que tener cuidado con las fugas y los riesgos de que un evento natural o artificial pueda destruir el ecosistema.

De existir información acerca de las tasas de mineralización (humificación) del carbono orgánico en los páramos, se podría justificar la realización de

³¹ Pombo, Diana. 2003. Comunicación Personal

proyectos MDL de conservación, claro está, no como la única herramienta sino como una herramienta adicional de gestión ambiental para lograr la conservación de éstos ecosistemas.

El problema del Cambio Climático es de carácter global, pero es necesario llevarlo a una escala local en donde se harían importantes, sino los mayores esfuerzos por mitigarlo y eso solo es posible incluyendo e involucrando a las comunidades locales. Considero necesaria la inclusión y participación de la población local en los proyectos, generando comprensión y apropiación de los procesos de conservación.

Los páramos se deben entender como una construcción territorial desde las épocas pre-americanas hasta el presente, dado que se desconoce la historia social y la correspondiente producción del espacio paramuno, las cuales se evidencian en formas de colonización temprana de origen indo-americano, colonización campesina desde el período colonial europeo, la tala de las selvas altoandinas que devinieron en páramos, el retroceso de áreas glaciares que igualmente se paramizaron; desconocimiento que hace suponer al investigador naturalista de las altas montañas ecuatoriales, que se encuentra en el páramo original, producto de especiales procesos ecológicos, evolutivos, adaptativos y convergentes de la vida; cuando en realidad son etapas sucesivas del bioma de páramo sobre los antiguos espacios de las selvas circundantes. El páramo no estaba donde hoy lo encontramos. Antes de abordarlo sistemáticamente a través de la investigación científica, lo habíamos construido en una buena proporción (Molano 2002).

Teniendo en cuenta los argumentos presentados anteriormente, las políticas ambientales y las normas por las cuales se implementen, deberán conciliar los intereses de conservación con los de la actividad humana de sus habitantes, atendiendo permanentemente a sus condiciones culturales. El diseño de alternativas de política debe incluir una evaluación integral de las condiciones de implementación reales (Guzmán 2002). De ésta misma forma, los proyectos de conservación en el contexto del cambio climático, deberán presentar un diseño similar al de las políticas mencionadas, siempre pensando en las condiciones específicas del área y potenciando los procesos endógenos, las ventajas culturales y bióticas de cada región y haciendo partícipes directos a las comunidades locales.

El IPCC ha expresado que los proyectos sobre uso del suelo y cambio de uso del suelo (LULUCF por sus siglas en inglés) encaminados a mitigar el cambio climático pueden proporcionar beneficios socioeconómicos y medioambientales principalmente dentro de las fronteras del proyecto, aunque podrían también entrañar un riesgo de producir efectos negativos. La experiencia adquirida hasta la fecha en la mayoría de los proyectos piloto indica que en muchas ocasiones es esencial la participación de los

interlocutores locales en el diseño y gestión de las actividades de los proyectos. Otros factores que afectan a la capacidad de los proyectos de aumentar la absorción de carbono y de evitar las emisiones de GEI y reportar otros beneficios son, en particular, la concordancia con los objetivos de desarrollo sostenible nacionales y/o internacionales, y la capacidad técnica e institucional para desarrollar y ejecutar directrices y mecanismos de protección en relación con los proyectos.

En términos de desarrollo sostenible, algunos de los factores clave que influyen en el éxito de actividades y proyectos LULUCF encaminadas a la mitigación y adaptación al cambio climático, son: la capacidad institucional y técnica para desarrollar y aplicar directrices y procedimientos; el volumen y efectividad de la participación de la colectividad local en las fases de desarrollo, puesta en práctica y distribución de beneficios; y la transferencia y adopción de tecnologías (IPCC 2000).

Precisamente, debido a que en muchos planes, programas, proyectos y políticas, no solo a nivel nacional sino a nivel global persiste la tendencia a mantener la dualidad estado-sociedad civil, en la Declaración de la sociedad civil en la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible en Johannesburgo, 2002, se reafirmó el principio de participación, reivindicando que la gente debe ser involucrada en el diseño de planes y estrategias para su propio desarrollo, al igual que en la toma de decisiones en los niveles local, nacional, regional e internacional.

Para lograr una participación proactiva y real, se necesitan dos pilares fundamentales. El primero de estos pilares es la **información**. Si la sociedad civil conoce la dimensión que puede alcanzar su propia participación y sus derechos, los procesos de gestión y protección de los recursos naturales y el medio ambiente, son más eficientes al tiempo que se logra una mayor proactividad de las personas.

El segundo pilar de esta propuesta es la **articulación** o conformación de asociaciones. La importancia de este aspecto radica en que al trabajar conjuntamente, se incentiva el flujo de información y se evita la realización de esfuerzos aislados, lo que facilita las posibilidades de llevar a cabo una mejor gestión. Además, conformando asociaciones, se potencian las experiencias exitosas para producir en forma conjunta unos mejores resultados³².

Por otra parte, dado que las tendencias a nivel internacional apuntan a que el MDL no será el instrumento más apropiado para conservar ecosistemas estratégicos como el páramo en términos de cambio climático, en su lugar se deberán explorar otros posibles instrumentos, probablemente ya no de mitigación sino de adaptación al cambio climático. Claro está que si el MDL,

³² García, J y Sosa, J, 2002. Inédito

todavía es inexistente y dependerá de que se ratifique el Protocolo de Kyoto, los mecanismos que se diseñen para que los países desarrollados inviertan en proyectos de adaptación en los países en vías de desarrollo son aún más inciertos³³.

Los instrumentos para la adaptación al cambio climático deberán nacer de los recursos que la comunidad internacional destine para este fin, en esto se avanzó en la COP 8. El Fondo Internacional para la Naturaleza (Global Environment Facility GEF), ha destinado unos recursos que se canalizaron a través del Banco Mundial para realizar el proyecto de adaptación al cambio climático INAP, que se realizará con el IDEAM, éste proyecto tendrá un especial énfasis en la vulnerabilidad de los ecosistemas de Páramo, dado que una afectación en éstos ecosistemas significaría una pérdida en la regulación hídrica, aspecto esencial para ciudades muy importantes en el país.³⁴

Sin embargo, hay dos aspectos que podrían afectar la captación de recursos en posibles proyectos de adaptación. El primero es que la prioridad a nivel internacional han sido los proyectos de mitigación y no los de adaptación. El segundo es que los países en desarrollo son los países que eventualmente se verían más afectados por los eventos de cambio climático y no han tenido los recursos suficientes para evaluar su vulnerabilidad.

Por ahora, se espera que los beneficios de instrumentos como el MDL para conservar los ecosistemas de páramo sean indirectos. Un ejemplo claro y reciente de ello es el proyecto de servicios ambientales del Río Amoyá, localizado en Chaparral (Tolima), de generación de energía hidroeléctrica a filo de agua. Se espera que en los primeros 14 años de operación comercial se desplacen cerca de 5,85 millones de toneladas métricas de CO₂, a través de la sustitución de combustibles contaminantes como fuente para la generación de energía eléctrica. La propuesta cuenta con un programa de protección y conservación del ecosistema de páramo del Parque Natural "Las Hermosas" y propone el desarrollo de un adecuado programa social orientado a la concertación con la comunidad que habita la zona de influencia del proyecto³⁵.

³³ Rodríguez, Manuel. 2003. Comunicación Personal.

³⁴ Arango, Francisco. 2003. Comunicación Personal. OCMCC

³⁵ Arango, Francisco. Noviembre de 2003. OCMCC

CONCLUSIONES

1. El MDL no será el instrumento directo más apropiado para conservar ecosistemas estratégicos como el páramo en términos de cambio climático y en su lugar se deberá explorar otros posibles instrumentos, probablemente ya no de mitigación sino de adaptación al cambio climático.
2. Únicamente el carbono contenido en el mantillo y la materia orgánica libre deben ser considerados como liberables a la atmósfera en los análisis de cambio climático.
3. La concentración de carbono orgánico total en el suelo no es un buen indicador relacionado con el cambio climático
4. El contenido de carbono en el mantillo, la materia orgánica libre y la fracción mineral pueden ser criterios muy importantes para conservar los suelos de páramo y con ellos todo el ecosistema a la luz del cambio climático.
5. En el estudio de la fracción del carbono del suelo que es liberable a la atmósfera, el enfoque metodológico usado en ésta investigación puede resultar más conveniente que la separación de raíces, suelo mineral y necromasa.
6. En el páramo de Chingaza, más de la mitad del carbono contenido en los suelos, podría ser liberado en forma de CO₂ por un eventual cambio en el uso del suelo.
7. Los páramos deben ser conservados en términos de cambio climático, no solo por ser indicadores del mismo y altamente vulnerables, sino porque su contenido de carbono en fracciones lábiles y mantillo, se emitiría directamente a la atmósfera contribuyendo al efecto invernadero.
8. La importancia del mantillo en el páramo de Chingaza, aparte de que protege el suelo de los agentes erosivos su alta capacidad de retención de agua, es su alto contenido de carbono.
9. Alrededor de $\frac{3}{4}$ partes de los suelos en el páramo de Chingaza corresponden a agua.

10. En el páramo de Chingaza no se encuentran diferencias significativas en el contenido de carbono en suelo, mantillo y materia orgánica libre entre vertientes húmedas y secas.
11. Las diferencias en los resultados del contenido de carbono en suelos en los diferentes estudios consultados se pueden deber a la forma de expresión de los datos de carbono y a los métodos aplicados, por ésta razón la estimación del contenido total de carbono en los suelos de páramo colombianos no fue posible.
12. La metodología IPCC 1996 puede resultar no muy conveniente para la estimación de carbono contenido en suelos en ecosistemas naturales como Chingaza. Un tipo de suelo puede tener características de otro de acuerdo con la clasificación del IPCC.
13. Los instrumentos para lograr la conservación de ecosistemas como el páramo, a la luz del cambio climático no están aún muy claros.
14. Definitivamente, la no inclusión de los proyectos de conservación dentro del MDL, responde más a intereses de tipo político que a criterios técnicos.
15. Los incentivos para proteger éstos ecosistemas como reguladores hídricos deben ser típicamente domésticos, pero el incentivo para conservarlos como mitigadores del cambio climático debe ser internacional.

RECOMENDACIONES

GENERALES

- ✍✍ En el análisis de un tema de carácter ambiental como el cambio climático, se deben incorporar tanto las variables biofísicas como las variables de índole social, sean políticas, culturales o económicas.
- ✍✍ Las futuras investigaciones sobre cambio climático deben considerar una separación de las formas lábiles de las no lábiles del carbono en el suelo.
- ✍✍ Se debe cambiar el paradigma de que todo el carbono en el suelo es liberable a la atmósfera.
- ✍✍ Debería incluirse como un compartimento de almacenaje el carbono ligado a la fracción mineral.

METODOLOGÍA

- ✍✍ Se debe tener especial cuidado en la forma en cómo se expresan los datos del contenido de carbono en los suelos, dado que como se vio puede generar confusiones y los estudios pueden no ser comparables.
- ✍✍ Para que los estudios futuros sean comparables, se recomienda que al menos los estudios sobre los contenidos de carbono y su relación con el cambio climático sigan los mismos protocolos.
- ✍✍ Se recomienda estandarizar un protocolo para el estudio del carbono en suelos, tanto en campo como en laboratorio ya que el problema con las diferencias de datos entre estudios puede deberse a utilizar protocolos diferentes para los mismos métodos.

INVESTIGACIONES Y PROYECTOS FUTUROS

- ✍✍ Se deben realizar los estudios de mantillo y materia orgánica libre en áreas disturbadas, además de considerar el componente vegetación en las áreas naturales; como también hace falta estudiar el carbono contenido en las turberas y el porcentaje de éste que sería susceptible de ser liberado.
- ✍✍ Se deben realizar estudios de suelos por compartimentos en todo el mundo, al menos llegar a factores de corrección por zonas, ya que el carbono total en suelos no es un buen indicador para el cambio climático.

- ✍✍ Hace falta estudiar en forma dinámica, cuánto carbono fija netamente un ecosistema como el páramo. Parte de los estudios futuros se deben enfocar en las tasas de mineralización (humificación) del carbono de las fracciones lábiles.

- ✍✍ Los incentivos deben considerar como mínimo, el costo de oportunidad de quienes transforman el páramo para que el beneficio colectivo sea más importante que el beneficio individual.

- ✍✍ De ser realidad los proyectos MDL, es altamente necesaria la inclusión y participación de la población local, para lo que se deben orientar esfuerzos en comunicación, educación y capacitación.

BIBLIOGRAFIA:

- ☞ ACCEFYN 1990. Inventario preliminar de Gases de Efecto Invernadero. Fuentes y Sumideros: Colombia 1990. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- ☞ Agriculture and Agri-Food Canada. S.F. Agricultural soil carbon links and the Kyoto Protocol: A practical opportunity for the environment. <http://www.agr.ca/policy/environment>
- ☞ Agrocadenas. 2003. Sitio Web del IICA - Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. <http://www.agrocadenas.gov.co>
- ☞ Andreux, F y A. Correa. S.F. Caractères généraux de la matière organique de sols eutrophes et mesotrophes affectés ou non par des migrations particulières. En: Colloques internationaux du CNRS No 303 – Migrations organo – minérales dans les sols tempérés. Nancy, France.
- ☞ Arana, A., N. Hoyos y M. Salazar. 2002. Proceso de participación social en la determinación de áreas naturales protegidas en ecosistemas altoandinos (páramos y bosques) de la Cordillera Central del departamento del Valle del Cauca. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC. En: Resúmenes: Congreso Mundial de Páramos. Estrategias para la conservación y sostenibilidad de sus bienes y servicios ambientales. Paipa, Colombia, Mayo 13-18 de 2002. pp. 76-77.
- ☞ Asher, S. 2001. Encyclopedia of Biodiversity. Volume 1 pp: 609-628. Academic Press. USA.
- ☞ ASOCARS. 2002. Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible. Recopilación de materiales relevantes para el proceso preparatorio de Río + 10. Consejo ad-hoc para el Desarrollo Sostenible de la Sociedad Civil y Autoridades Ambientales Autónomas Regionales y Urbanas. "El Conversatorio" Año 1 No. 1. Bogotá, Colombia.
- ☞ Asrar, G., y J. Dozier. 1994. EOS. Science Strategy for the Earth observing system.
- ☞ BBVA. 2000. El Cambio Climático. El Campo de las ciencias y las artes. Servicio de Estudios del Banco Bilbao Vizcaya Argentaria. 2000 No. 137. Madrid, España.

- ☞☞Bendeck, M. 1992. Caracterización del humus en suelos del noroccidente del Caquetá. Trabajo de grado de la Maestría en Suelos y Fitotecnia de la Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía. Bogotá. Colombia.
- ☞☞C.A.B. International. 1989. Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods. IUBS, ISSS & UNESCO. The Cambrian News. United Kingdom.
- ☞☞Capra, F. 1998. La Trama de la Vida; una nueva perspectiva de los sistemas vivos. Ed. Anagrama, Barcelona.
- ☞☞Castro, R., S. Cordero y C. Acevedo Editores. 2002. Casos Latinoamericanos de Cambio Climático y Desarrollo. Primera Edición. 350 pp. COPIECO de San Pedro. San José, Costa Rica.
- ☞☞Cortés, A. 1994. Los suelos de páramo: Reguladores del recurso hídrico en Boyacá. Dirección del Centro de Investigaciones Científicas. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Santafé de Bogotá. Colombia.
- ☞☞Chamorro, C. 1989. Efecto del uso del suelo sobre la composición edafofaunística de los páramos que circundan la ciudad de Bogotá. En: Suelos Ecuatoriales. Volumen XIX, No. 1. 1989. Bogotá. Colombia. pp. 48-62.
- ☞☞Dale, V. 1997. The relationship between Land-use Change and Climate Change. Ecological Applications. 7 (3) 1997 pp. 753-769. Ecological Society of America.
- ☞☞Del Valle, J. I., S. Orrego, H. Moreno y T. Black. 2003. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia. Contribuciones para la mitigación del Cambio Climático. CAEMA – Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- ☞☞Diaz, E. y L. Paz 2002. Evaluación del régimen de humedad del suelo bajo diferentes usos, en los Páramos Las Animas (Municipio de Silvia) Y Piedra de León (Municipio de Sotará). Departamento del Cauca. Tesis de grado de Ecología de la Fundación Universitaria de Popayán. Colombia 2002.
- ☞☞Duchafour 1984. Edafología I. Edafogénesis y clasificación. Masson, S.A. Barcelona, España.
- ☞☞European Commission. 2002. EU focus on Climate Change. European Communities. Belgium. 2002.

- ☞ Falconer, A., y J. Foresman. 2002. A system for Survival. GIS and Sustainable Development. ESRI. United States of America.
- ☞ Guzmán, P. 2002. Dimensión jurídica y económica para la implementación de políticas de conservación para los páramos. Universidad Externado de Colombia – Derecho Ambiental. En: Resúmenes: Congreso Mundial de Páramos. Estrategias para la conservación y sostenibilidad de sus bienes y servicios ambientales. Paipa, Colombia, Mayo 13-18 de 2002. pp. 90.
- ☞ Hernández, A. 1998. Principales Convenios Internacionales sobre Medio Ambiente aprobados por Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Colombia 1998.
- ☞ Hofstede, R. 1999. El páramo como espacio para la fijación de carbono atmosférico. En: Medina, G y P. Mena (Eds). 1999. El páramo como espacio de mitigación de carbono atmosférico. Serie Páramo 1. GTP/Abya Yala. Quito. Ecuador.
- ☞ Hofstede, R. 1995. Effects of burning and grazing on a Colombian páramo ecosystem. WOTRO – ICG.
- ☞ IDEAM. 2003. Diagnóstico Ambiental del Predio El Palomar del Parroquiano, Veredas Parroquia Vieja y Salamanca, jurisdicción de los municipios de Ventaquemada y Samacá. Colombia.
- ☞ IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. 2002. Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en condición Hot Spot & Global Climatic Tensor. IDEAM - Colombia
- ☞ IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. 2001. Colombia. Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Bogotá. Colombia.
- ☞ IGAC 2000. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá. Colombia.
- ☞ IGAC. 1988. Estudio semidetallado de suelos de áreas representativas de los páramos de Sumapaz, Neusa y Chingaza (Departamento de Cundinamarca). Bogotá. Colombia.

- IGAC 1990. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. Bogotá. Colombia.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. S.F. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático – UNFCCC Análisis a la luz del Convenio sobre Diversidad Biológica.
- IPCC. 2001a. Tercer informe de evaluación. Cambio Climático 2001. La base científica. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. OMM-PNUMA.
- IPCC. 2001b. Cambio Climático 2001: Informe de Síntesis. Resumen para Responsables de Políticas. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. OMM-PNUMA.
- IPCC. 2001c. Tercer informe de evaluación. Cambio Climático 2001. Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. OMM-PNUMA.
- IPCC. 2000. Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Informe especial del IPCC. [R. T. Watson, I. R. Noble, B. Bolin, N. H. Ravindranath y D. J. Verardo, D. J. Dokken, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE.UU., 377 págs.
- IPCC. 1996. Directrices del IPCC para los inventarios de los gases de efecto invernadero, versión revisada en 1996: Libro de trabajo. Módulo 5. Cambio de uso de la tierra y silvicultura.
- Klinka, K., R. Green, L. Trowbridge y L. Lowe. 1981. Taxonomic classification of humus forms in ecosystems of British Columbia. First Approximation. Province of British Columbia. Ministry of Forest, Vancouver, Canadá.
- Malagón, D. 2002. Los suelos de las regiones paramunas de Colombia y Venezuela. En: Resúmenes: Congreso Mundial de Páramos. Estrategias para la conservación y sostenibilidad de sus bienes y servicios ambientales. Paipa, Colombia, Mayo 13-18 de 2002. pp. 39-40
- Margalef, R. 1992. Ecología. Editorial Planeta S.A. Barcelona, España.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Estado de las Negociaciones Internacionales en materia de reglamentación de

los proyectos forestales en el marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. 2003 (sin publicar).

- ✍️✍️ Ministerio del Medio Ambiente y Banco Mundial. 2000. Estudio de Estrategia Nacional para la implementación del MDL en Colombia Informe final. Abril de 2000. Bogotá, Colombia.
- ✍️✍️ Molano, J. 2002. Los páramos, producción social del espacio en las altas montañas ecuatoriales. Univesidad de Los Andes, Colombia. En: Resúmenes: Congreso Mundial de Páramos. Estrategias para la conservación y sostenibilidad de sus bienes y servicios ambientales. Paipa, Colombia, Mayo 13-18 de 2002. pp. 76.
- ✍️✍️ Monasterio, M. y M. Molinillo. 2002. Integrando el Desarrollo Agrícola y la Conservación de áreas frágiles en los páramos de la Cordillera de Mérida, Venezuela. En: Resúmenes: Congreso Mundial de Páramos. Estrategias para la conservación y sostenibilidad de sus bienes y servicios ambientales. Paipa, Colombia, Mayo 13-18 de 2002. pp. 75.
- ✍️✍️ Odum, E. P. 1980. Ecología: El vínculo entre las ciencias naturales y sociales. Tercera Edición. Compañía editorial continental S.A. México.
- ✍️✍️ Oficina Argentina del Mecanismo para un Desarrollo Limpio, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 2003. Proyectos Forestales en el MDL. <http://www.medioambiente.gov.ar>
- ✍️✍️ Ponce de León, E 2002. Marco jurídico colombiano relacionado con los páramos. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. En: Resúmenes: Congreso Mundial de Páramos. Estrategias para la conservación y sostenibilidad de sus bienes y servicios ambientales. Paipa, Colombia, Mayo 13-18 de 2002. pp. 84-85.
- ✍️✍️ Prieto, A. 2002. Ecología de los Ambientes Paramunos. En: Herramientas e Instrumentos de Política para la Gestión Ambiental Local y Regional de los Páramos. Villa de Leyva, Colombia.
- ✍️✍️ Rangel, J. 2000. Colombia. Diversidad Biótica III. La región de vida paramuna de Colombia. Universidad Nacional de Colombia
- ✍️✍️ Red de Desarrollo Sostenible. 2002. Cumbre Mundial Sobre Desarrollo Sostenible, Johannesburgo 2002. <http://www.rds.org.co>

- ☞☞Rodríguez, M. 1994. Crisis Ambiental y Relaciones Internacionales. Hacia una estrategia colombiana. CEREC: Serie ecológica No. 6. Bogotá, Colombia.
- ☞☞Rondón, M., E. Amézquita, E. Díaz, L. Paz y Chávez, J. 2002. Efecto de cambios en el uso del suelo sobre los almacenamientos de carbono y flujos de gases de efecto invernadero en áreas del páramo de Las Ánimas, Cauca – Colombia. CIAT – Universidad del Cauca – CRC. En: Resúmenes: Congreso Mundial de Páramos. Estrategias para la conservación y sostenibilidad de sus bienes y servicios ambientales. Paipa, Colombia, Mayo 13-18 de 2002. pp. 106-107.
- ☞☞Rondón, M. 2000. Los Páramos Andinos frente al calentamiento global. Historia de una sed anunciada. En: Revista Investigación y Ciencia. Vol. IX. año 2000 Asociación Colombiana para el avance de la Ciencia. A.C.A.C. pp. 46-53.
- ☞☞SCCS. 1991. Fundamentos para la Interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. Colombia.
- ☞☞Sentis, I. 1994. La Materia Orgánica y la degradación y erosión de suelos en el trópico. En: Memorias del VII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 1994. Bucaramanga. Colombia. pp. 38-47.
- ☞☞Sevink, J. y J. Lips. 1987. Humus Forms, Humus Description, Sampling. Documento de discusión preseal grupo de trabajo sobre unificación de metodologías en las áreas de trabajo del Proyecto Tropenbos.
- ☞☞Stanley, W., K. Sebastian y S.J. Scherr. 2000. Pilot Analysis of Global Ecosystems. World Resources Institute. USA
- ☞☞UNDP. 1998. Issues and Options. The Clean Development Mechanism. United Nations Publications.
- ☞☞United Nations. 2002. Johannesburg Summit 2002. National Implementation of Agenda 21: A summary. United Nations, New York 2002.
- ☞☞United Nations. 1992. Agenda 21: The Rio Declaration on Environment and Development. New York: United Nations.

ANEXOS:

ANEXO No. 1 Contenidos de Carbono Orgánico por superficies de suelos en los distritos de páramos de Colombia.

DISTRITO	Km ²					Área total
	MUY ALTO	ALTO	MEDIO	BAJO	MUY BAJO	
Cerro Calima	59					59
Cerro Plateado	185					185
Citara - Tatama	1.270	182	133			1.585
Cordillera Los Cobardes		19			82	101
Distrito Paramos Boyacá	3.517	1.359	1.637	473	3.373	10.358
Distrito Paramos Cundinamarca	3.035	2.954	984	81	733	7.787
Distrito Paramos Macizo Colombiano	2.622				162	2.784
Distrito Paramos Nariño-Putumayo Troncal Sur	4.901	482	69	375	1	5.828
Distrito Paramos Perijá		171	24		19	215
Distrito Paramos Quindío	1.755	322	43		871	2.991
Distrito Paramos Santa Marta			595	44	959	1.597
Distrito Paramos Santanderes	102	1.038	1.057	389	1.198	3.784
Distrito Paramos Tolima - Huila	5.940	199	698	88	150	7.075
Farallones de Cali	49	2	0		362	414
Los Picachos	144		318	3	1	466
Paramillo - Frontino	408	1	145	47		601
Santa Inés	174		369	5		548
Total general	24.160	6.730	6.072	1.506	7.910	46.635
Porcentaje del total	52%	14%	13%	3%	17%	100%

Fuente: Modificado de IDEAM, sin publicar

Rangos:

Muy bajo: <1 % C; **Bajo:** 1 - 1,5% C;
Medio: 1,5 - 2,5 % C; **Alto:** 2,5 - 6 % C; **Muy alto:** > 6% C

ANEXO No. 2 Distribución promedio de los contenidos de Carbono Orgánico total en mantillo, suelo y en la fracción mayor de 100 μ m* por unidad de muestreo.

Suelo según clasificación IPCC	Muestra No.	g de C Orgánico total en 100 g de Suelo en campo	g de C de la fracción mayor de 100 μ m* en 100 g de suelo en campo	Porcentaje del carbono total como Carbono Orgánico Libre	g de C total en 100 g de mantillo en campo
Volcánico	1	9,50	0,72	7%	9,87
Pantanosos	3	8,35	0,57	7%	10,61
Arenoso	2	11,14	0,45	4%	10,48
Arenoso	5	7,75	1,04	13%	7,95
Poco activo	6	8,48	0,60	7%	9,07
Poco activo	4	7,62	0,59	8%	9,64
	Promedio	8,81	0,66	8%	9,61
	Desviación estándar	1,32	0,20	2.69	0,98

* Correspondiente a la Materia Orgánica Libre (MOL)

ANEXO NO. 3 Distribución de los contenidos de Carbono Orgánico, pesos y capacidad de retención de humedad del mantillo por unidades de muestreo.

Muestras de Mantillo	Réplica	%de Carbono Orgánico en mantillo en campo.	g de C en 100 g de unidad de muestreo (expresado en (% de C* peso en campo)/100)	g de Carbono Orgánico en 100 g de mantillo seco en estufa a 70°C	Peso en campo (g)	Peso en seco (g)	Capacidad de retención de humedad por el mantillo (léase veces su peso en seco)
1	1	11,51	16,11	40,282	140	40	2,5
	2	10,21	16,33	44,143	160	37	3,3
	3	10,35	18,63	34,507	180	54	2,3
	4	7,91	19,78	35,959	250	55	3,5
	5	9,37	11,24	38,775	120	29	3,1
S.D.		1,33	3,28	3,78	50	11,24	0,52
2	1*	9,52	47,61	38,709	500	123	3,1
	2	14,35	22,96	41,008	160	56	1,9
	3	8,51	29,78	39,71	350	75	3,7
	4	11,18	16,77	40,909	150	41	2,7
	5	8,83	29,12	39,358	330	74	3,5
S.D.		2,39	11,54	0,97	146,18	30,88	0,71
3	1*	10,89	58,83	40,293	540	146	2,7
	2*	11,87	7,12	35,607	60	20	2,0
	3	8,35	20,80	41,602	249	50	4,0
	4	11,16	40,19	46,728	360	86	3,2
	5	10,78	28,03	41,217	260	68	2,8
S.D.		1,33	19,63	3,96	175,22	47,05	0,73
4	1	12,15	52,24	40,183	430	130	2,3
	2	9,67	112,18	44,517	1160	252	3,6
	3	8,23	95,52	43,417	1160	220	4,3
	4	7,71	87,92	41,668	1140	211	4,4
	5	10,45	118,09	45,419	1130	260	3,3
S.D.		1,77	25,93	2,12	321,14	51,62	0,85
5	1	7,75	18,61	40,458	240	46	4,2
	2	6,96	22,63	42,702	325	53	5,1
	3	6,47	19,40	39,6	300	49	5,1
	4*	7,32	23,78	44,044	325	54	5,0
	5*	11,27	19,16	39,908	170	48	2,5
S.D.		1,91	2,32	2,75	66,76	3,39	1,11
6	1	8,46	18,62	42,317	220	44	4,0
	2	8,69	10,86	38,775	125	28	3,5
	3	8,73	14,84	31,581	170	47	2,6
	4	9,31	11,17	37,224	120	30	3,0
	5	10,18	17,31	40,26	170	43	3,0
S.D.		0,72	3,51	4,06	40,68	8,73	0,54

* Estos datos merecen un mayor escrutinio

ANEXO NO. 4 Distribución de los contenidos de Carbono Orgánico total, en la fracción mayor de 100µm, peso y capacidad de retención de humedad del suelo por unidades de muestreo.

Muestra de suelos	Réplica	g de C Orgánico total en 100 g de Suelo en campo	g de C de la fracción mayor de 100µm* en 100 g de suelo en campo	g de C Orgánico total en 100 g de Suelo seco al aire	g de C de la fracción mayor de 100µ en 100 g de suelo seco al aire	Porcentaje del carbono total como Carbono Orgánico Libre	Peso húmedo total en campo g	Peso total seco en estufa a 70°C	Capacidad de retención de humedad por el suelo (léase su peso en seco)
1	1	9,73	0,61	28,80	1,82	6%	370	107,5	2,4
	2	10,90	1,11	24,61	2,50	10%	350	134,85	1,6
	3	7,88	0,45	20,81	1,18	6%	330	110	2,0
2	1	11,28	0,47	27,08	1,13	4%	240	88	1,7
	2	10,93	0,51	27,31	1,27	5%	300	105,6	1,8
	3	11,20	0,37	24,98	0,83	3%	290	119,6	1,4
3	1	7,53	0,38	27,21	1,38	5%	300	72,21	3,2
	2	10,60	0,86	27,83	2,26	8%	420	140,8	2,0
	3	6,92	0,48	20,54	1,41	7%	490	145,2	2,4
4	1	8,21	0,45	32,82	1,79	5%	640	137,6	3,7
	2	6,96	0,56	33,99	2,74	8%	1050	184,9	4,7
	3	7,70	0,76	34,36	3,41	10%	580	119,6	3,8
5	1	7,60	0,96	30,14	3,82	13%	440	98,79	3,5
	2	8,83	1,18	30,51	4,07	13%	380	95,7	3,0
	3	6,81	0,97	30,55	4,37	14%	570	110,49	4,2
6	1	8,78	0,33	28,11	1,04	4%	720	193,5	2,7
	2	6,71	0,75	26,84	2,99	11%	660	141,9	3,7
	3	9,94	0,74	22,54	1,67	7%	680	267	1,5

ANEXO No. 5 Principales cálculos y conversiones de los resultados.

Clasificación según IPCC	UNIDAD SEGÚN IGAC	Área (Hectáreas)	Densidad Aparente del suelo Kg/ha	%de C total en suelo en campo	% de C en el Mantillo en campo	Profundidad del suelo m	Profundidad del mantillo m	Porcentaje del carbono total como Carbono Orgánico Libre	Densidad aparente del mantillo (asumida ³⁶) Kg/ha	Peso del suelo por hectárea a 20 cm de profundidad (kg)	Kg de C/1Kg de suelo	Kg de suelo por área total a 20 cm de profundidad
Volcánico	MGIf	4.924	0,0004	9,5	9,87	0,2	0,03	0,07	0,0003000	800.000	0,0095033	3.939.288.000
Volcánico	MKCe	787	0,001	9,5	9,87	0,2	0,03	0,07	0,0003000	2.000.000	0,0095033	1.574.680.000
Volcánico	MKcf	510	0,001	9,5	9,87	0,2	0,03	0,07	0,0003000	2.000.000	0,0095033	1.020.960.000
Volcánico	MLIf	101	0,00075	9,5	9,87	0,2	0,03	0,07	0,0003000	1.500.000	0,0095033	150.915.000
Volcánico	MLIg	868	0,00075	9,5	9,87	0,2	0,03	0,07	0,0003000	1.500.000	0,0095033	1.301.790.000
Volcánico	MLKd	0,8	0,00062	9,5	9,87	0,2	0,03	0,07	0,0003000	1.240.000	0,0095033	992.000
Arenoso	MEFg	15.397	0,00064	9,12	9,17	0,2	0,04	0,08	0,0003000	1.280.000	0,0091208	19.708.211.200
Arenoso	MGTd	1.600	0,00064	9,12	9,17	0,2	0,04	0,08	0,0003000	1.280.000	0,0091208	2.048.294.400
Arenoso	MGNa	406	0,0007	9,12	9,17	0,2	0,04	0,08	0,0003000	1.400.000	0,0091208	568.008.000
Arenoso	MGNb	167	0,0007	9,12	9,17	0,2	0,04	0,08	0,0003000	1.400.000	0,0091208	234.220.000
Arenoso	MGNc	0,03	0,0007	9,12	9,17	0,2	0,04	0,08	0,0003000	1.400.000	0,0091208	42.000
Pantanosos	MEAd	1.743	0,0007	8,35	10,61	0,2	0,07	0,07	0,0003000	1.400.000	0,0083489	2.439.808.000
Pantanosos	MEFe	6.067	0,0007	8,35	10,61	0,2	0,07	0,07	0,0003000	1.400.000	0,0083489	8.493.632.000
Poco activo	MGFf	589	0,0007	7,62	9,64	0,2	0,03	0,08	0,0003000	1.400.000	0,0076227	824.250.000
Poco activo	MGFe	772	0,0007	7,62	9,64	0,2	0,03	0,08	0,0003000	1.400.000	0,0076227	1.080.590.000
Poco activo	MGSg	26	0,0007	7,62	9,64	0,2	0,03	0,08	0,0003000	1.400.000	0,0076227	36.246.000

³⁶ El mantillo es un material de origen vegetal de densidad similar a la cascarilla de arroz, cuya densidad aparente es 0.3 g/cm³ (0.0003 kg / ha), o el aserrín: 0.28 g/cm³ (0.00028 kg / ha). Bendeck, Myriam. 2003. Comunicación Personal

ANEXO No. 5 Principales cálculos y conversiones de los resultados. (Continuación).

Clasificación según IPCC	UNIDAD SEGÚN IGAC	Kg de C/Ha a 20 cm de prof	Kg de C/Área total a 20 cm de prof	Kg de COL/Área total a 20 cm de prof	Kg de mantillo por hectárea	Kg de C/1Kg de mantillo	Kg de mantillo por Área total	Kg de C en mantillo/Ha	Kg de C en Mantillo/ Área total	T de C/Ha a 20 cm de prof	T de C/Área total a 20 cm de prof	T de COL/Área total a 20 cm de prof	T de C en mantillo/ Área total
Volcánico	MGIf	7.603	37.436.069	2.620.525	90.000	0,009870	443.169.900	888	4.374.168	8	37.436	2.621	4.374
Volcánico	MKCe	19.007	14.964.590	1.047.521	90.000	0,009870	70.860.600	888	699.407	19	14.965	1.048	699
Volcánico	MKcf	19.007	9.702.446	679.171	90.000	0,009870	45.943.200	888	453.468	19	9.702	679	453
Volcánico	MLIf	14.255	1.434.184	100.393	90.000	0,009870	9.054.900	888	89.374	14	1.434	100	89
Volcánico	MLIg	14.255	12.371.246	865.987	90.000	0,009870	78.107.400	888	770.934	14	12.371	866	771
Volcánico	MLKd	11.784	9.427	660	90.000	0,009870	72.000	888	711	12	9	1	1
Arenoso	MEFg	11.675	179.753.823	14.380.306	120.000	0,009169	1.847.644.800	1.100	16.940.937	12	179.754	14.380	16.941
Arenoso	MGTd	11.675	18.681.997	1.494.560	120.000	0,009169	192.027.600	1.100	1.760.689	12	18.682	1.495	1.761
Arenoso	MGNa	12.769	5.180.663	414.453	120.000	0,009169	48.686.400	1.100	446.402	13	5.181	414	446
Arenoso	MGNb	12.769	2.136.264	170.901	120.000	0,009169	20.076.000	1.100	184.076	13	2.136	171	184
Arenoso	MGNc	12.769	383	31	120.000	0,009169	3.600	1.100	33	13	0,3831	0,0306	0,0330
Pantano-so	MEAd	11.688	20.369.658	1.425.876	210.000	0,010612	365.971.200	2.228	3.883.648	12	20.370	1.426	3.884
Pantano-so	MEFe	11.688	70.912.291	4.963.860	210.000	0,010612	1.274.044.800	2.228	13.520.031	12	70.912	4.964	13.520
Poco activo	MGFf	10.672	6.283.020	502.642	90.000	0,009643	52.987.500	868	510.971	11	6.283	503	511
Poco activo	MGFe	10.672	8.237.025	658.962	90.000	0,009643	69.466.500	868	669.882	11	8.237	659	670
Poco activo	MGSg	10.672	276.293	22.103	90.000	0,009643	2.330.100	868	22.470	11	276	22	22